

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
19. November 2015 (19.11.2015)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2015/173397 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
G03F 7/20 (2006.01) **G03F 1/84** (2012.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/060770
- (22) Internationales Anmeldedatum:
15. Mai 2015 (15.05.2015)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2014 209 348.1 16. Mai 2014 (16.05.2014) DE
- (71) Anmelder: **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE];
Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).
- (72) Erfinder: **PETRI, Christoph**; Am Holunderrain 16,
73447 Oberkochen (DE). **WALD, Christian**;
Rechbergstrasse 11, 73434 Aalen (DE). **RUNDE, Daniel**;
Dives-Sur-Mer-Strasse 9, 73447 Oberkochen (DE).
- (74) Anwalt: **PATENTANWALTSKANZLEI WILHELM &
BECK**; Prinzenstr. 13, 80639 München (DE).

- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,
CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE,
IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,
RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: DETERMINATION OF A CORRECTED VARIABLE

(54) Bezeichnung : ERMITTLUNG EINER KORRIGIERTEN GRÖSSE

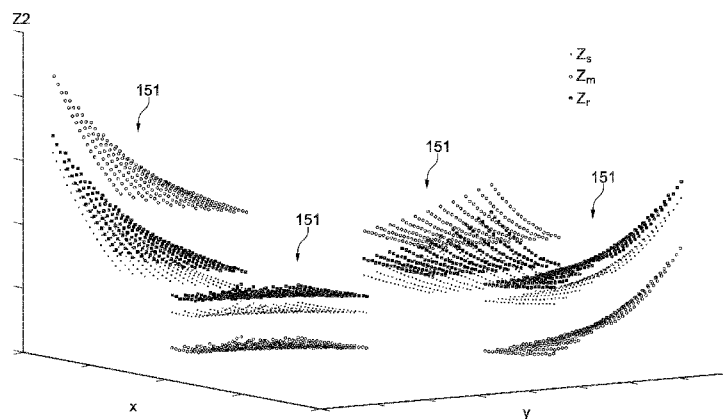


Fig. 7

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining a corrected variable, which depends on at least one parameter, in a parameter range of the at least one parameter. The method comprises the step of carrying out a measurement, measurement values of the variable being made available in a plurality of separate and non-overlapping subranges of the parameter range. The method further comprises the step of correcting measurement values of the variable using an approximation, in which measurement values of the variable are approximated with the aid of a smooth function and with the aid of subrange functions of the subranges of the parameter range. The smooth function allows reproduction of the progression of the variable over the parameter range. The subrange functions allow an individual change of the variable in the subranges of the parameter range to be brought about. The invention further relates to a method for adjusting imaging optics of an optical system, and to a device for determining a corrected variable, which depends on at least one parameter, in a parameter range of the at least one parameter. The invention also relates to a method for determining a plurality of corrected wavefront errors in an image field.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2015/173397 A1

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Parameter abhängigen Größe in einem Parameterbereich des mindestens einen Parameters. Das Verfahren umfasst ein Durchführen einer Messung, wobei Messwerte der Größe in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen des Parameterbereichs bereitgestellt werden. Das Verfahren umfasst des Weiteren ein Durchführen einer Korrektur von Messwerten der Größe unter Verwendung einer Approximation, in welcher Messwerte der Größe mit einer glatten Funktion und mit den Teilbereichen des Parameterbereichs zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden. Mit Hilfe der glatten Funktion ist ein Verlauf der Größe über den Parameterbereich wiedergebar. Mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen ist eine individuelle Veränderung der Größe in den Teilbereichen des Parameterbereichs hervorruftbar. Die Erfindung betrifft des Weiteren ein Verfahren zur Justage einer Abbildungsoptik eines optischen Systems, und eine Vorrichtung zur Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Parameter abhängigen Größe in einem Parameterbereich des mindestens einen Parameters. Die Erfindung betrifft darüber hinaus ein Verfahren zur Ermittlung von mehreren korrigierten Wellenfrontfehlern in einem Bildfeld.

Beschreibung

Ermittlung einer korrigierten Größe

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur
Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Para-
meter abhängigen Größe in einem Parameterbereich des mindes-
tens einen Parameters. Die Erfindung betrifft des Weiteren
10 ein Verfahren zur Justage einer Abbildungsoptik eines opti-
schen Systems, und ein Verfahren zur Ermittlung von mehreren
korrigierten Wellenfrontfehlern in einem Bildfeld.

Diese Patentanmeldung beansprucht die Priorität der deutschen
Patentanmeldung 10 2014 209 348.1, deren Offenbarungsgehalt
15 hiermit durch Rückbezug aufgenommen wird.

Zu einer Größe, welche von mindestens einem Parameter abhän-
gig ist, können mit Hilfe einer Messung Messwerte in einem
interessierenden Parameterbereich des mindestens einen Para-
20 meters bereitgestellt werden. Ein Durchführen der Messung in
dem gesamten Parameterbereich kann, je nach Umfang des Para-
meterbereichs und Genauigkeit der Messung, mit einem hohen
Aufwand und mit hohen Kosten einer zur Messung eingesetzten
Messeinrichtung verbunden sein. Dies kann umgangen werden,
25 indem Messwerte der Größe lediglich in Teilbereichen des Pa-
rameterbereichs gewonnen werden. Hierbei kann es sich um dis-
junkte, d.h. separate und nicht überlappende Teilbereiche
handeln.

30 Eine solche Vorgehensweise kommt zum Beispiel bei einem opti-
schen Inspektionssystem in Betracht, welches zur Untersuchung
eines Objekts, beispielsweise einer Lithographiemaske bzw.
eines Retikels, dient. Das Inspektionssystem kann Mittel zum
Beleuchten des in einer Objektebene angeordneten Objekts mit
35 einer Strahlung und eine Abbildungsoptik aufweisen. Mit Hilfe
der Abbildungsoptik kann ein Objektfeld in ein Bildfeld einer

Bildebene abgebildet werden. Zur Strahlungsmessung kann ein in der Bildebene angeordneter Sensor zum Einsatz kommen.

Bei dem Inspektionssystem kann es von Interesse sein, einen von der Abbildungsoptik verursachten Abbildungs- bzw. Wellenfrontfehler in dem Bildfeld zu ermitteln. Hierbei stellen der Wellenfrontfehler die oben genannte Größe und das Bildfeld den Parameterbereich, vorliegend mit zwei Parametern in Form von Ortskoordinaten, dar. Anstatt die Strahlungsmessung zum Bereitstellen von Messwerten des Abbildungsfehlers in dem gesamten Bildfeld durchzuführen, kann sich die Messung auf disjunkte Teilbereiche bzw. Teilfelder des Bildfelds beziehen. Dies lässt sich zum Beispiel verwirklichen, indem ein zur Messung eingesetzter Sensor nacheinander an unterschiedlichen Messpositionen angeordnet wird. Hierbei werden mit Hilfe des Sensors nacheinander mehrere Teilmessungen durchgeführt, und wird der Sensor dazwischen zu den einzelnen Messpositionen bewegt. Möglich ist auch eine Strahlungsmessung mit Hilfe eines Sensors, welcher Teilsensoren mit nicht überlappenden Erfassungsbereichen aufweist.

Ein Bereitstellen von Messwerten einer Größe in mehreren bzw. disjunkten Teilbereichen eines Parameterbereichs kann zur Folge haben, dass die Messwerte der Größe in den einzelnen Teilbereichen mit Messfehlern behaftet sind, welche lediglich individuell in den entsprechenden Teilbereichen auftreten. Von Teilbereich zu Teilbereich kann ein variierender Messfehler vorliegen. Eine solche Verfälschung der Messwerte der Größe beeinträchtigt deren Aussagekraft.

Im Hinblick auf das oben beschriebene Inspektionssystem kann das Ermitteln eines Wellenfrontfehlers dazu dienen, Justageprozesse zur Justage der Abbildungsoptik zu bestimmen, um deren Abbildungsfehler zu verkleinern. Die Verwendung eines Sensors an unterschiedlichen Messpositionen kann mit Fehlpositionierungen des Sensors einhergehen. Dies kann dazu führen, dass Messwerte des Wellenfrontfehlers in einzelnen Teil-

bereichen des Bildfelds jeweils mit einem konstanten Messfehler (Versetzung bzw. Offset) behaftet sind. Die Offsetfehler können deutlich größer sein als andere Messfehler und insbesondere als die Feldvariation des von der Abbildungsoptik herrührenden Wellenfrontfehlers. Dies erschwert die Bestimmung von geeigneten Justageprozessen. Ein derartiger Nachteil kann in entsprechender Weise bei Verwendung eines Sensors mit mehreren nicht überlappenden Teilsensoren auftreten. Hierbei können in Teilbereichen des Bildfelds auftretende Offsetfehler eine Folge von Lagefehlern der Teilsensoren sein.

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren und eine Vorrichtung anzugeben, mit deren Hilfe eine zuverlässige Korrektur von Messwerten einer Größe durchführbar ist, wobei die Messwerte in Teilbereichen eines Parameterbereichs gewonnen werden. Eine weitere Aufgabe besteht darin, ein kostengünstiges und zuverlässiges Verfahren zur Justage einer Abbildungsoptik eines optischen Systems anzugeben. Eine weitere Aufgabe besteht darin, ein zuverlässiges Verfahren zur Ermittlung von mehreren korrigierten Wellenfrontfehlern in einem Bildfeld anzugeben.

Diese Aufgaben werden durch die Merkmale der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weitere vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Parameter abhängigen Größe in einem Parameterbereich des mindestens einen Parameters vorgeschlagen. Das Verfahren umfasst ein Durchführen einer Messung, wobei Messwerte der Größe in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen des Parameterbereichs bereitgestellt werden. Das Verfahren umfasst des Weiteren ein Durchführen einer Korrektur von Messwerten der Größe unter Verwendung einer Approximation, in welcher Messwerte der Größe mit einer glatten Funktion und mit den Teilbereichen des Parameterbereichs zugeordneten Teilbe-

reichsfunktionen approximiert werden. Mit Hilfe der glatten Funktion ist ein Verlauf der Größe über den Parameterbereich wiedergebar. Mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen ist eine individuelle Veränderung der Größe in den Teilbereichen des
5 Parameterbereichs hervorruftbar.

Bei dem Verfahren werden Messwerte der Größe, welche sich auf dazugehörige Werte des mindestens einen Parameters beziehen, in mehreren disjunkten Teilbereichen des Parameterbereichs
10 bereitgestellt. Dies macht es möglich, die zugrundeliegende Messung mit einem geringen Messaufwand und geringen Kosten durchzuführen. Diese Vorgehensweise kann jedoch mit einer fehlerhaften Messung verbunden sein, so dass die Messwerte der Größe in einzelnen Teilbereichen des Parameterbereichs
15 jeweils eigene und von anderen Teilbereichen unabhängige Messfehler aufweisen können.

Zur Unterdrückung bzw. Korrektur derartiger Messfehler wird bei dem Verfahren ausgenutzt, dass die tatsächliche, d.h. oh-
20 ne Messfehler behaftete Größe bezogen auf den Parameterbereich entsprechende Regelmäßigkeiten bzw. vorhersagbare Eigenschaften aufweisen kann, und sich demzufolge durch eine glatte Funktion über den Parameterbereich beschreiben lässt. Bei den individuellen Messfehlern in den Teilbereichen liegen
25 im Unterschied hierzu solche Regelmäßigkeiten nicht bzw. im Wesentlichen nicht vor.

Diesem Umstand trägt das Verfahren Rechnung, indem die Messwerte der Größe sowohl mit einer den Verlauf der Größe über
30 den Parameterbereich abbildenden glatten Funktion als auch mit den Teilbereichen zugeordneten Teilbereichsfunktionen angenähert werden. Über die Teilbereichsfunktionen kann im Rahmen der Approximation jeweils eine individuelle Veränderung der Größe in den dazugehörigen Teilbereichen, also unabhängig
35 von anderen Teilbereichen, hervorgerufen werden. Auf diese Weise ist es möglich, den Effekt einer fehlerhaften Messung der Größe in den betreffenden Teilbereichen und damit das

Auftreten der Messfehler mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen nachzubilden. Infolgedessen kann mit Hilfe der glatten Funktion und der Teilbereichsfunktionen eine genaue Annäherung an die Messwerte der Größe mit einer kleinen bzw. minimalen Abweichung erzielt werden.

Die mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen bewirkbare individuelle Veränderung der Größe in einzelnen Teilbereichen des Parameterbereichs wird nicht nur zur Approximation genutzt, sondern dient auch als Grundlage zur Korrektur. Hierbei können individuelle Messfehler in einzelnen Teilbereichen unterdrückt, also eliminiert oder zumindest teilweise bzw. zu einem wesentlichen Teil verringert werden. Es ist daher möglich, eine korrigierte bzw. rekonstruierte Größe in dem Parameterbereich bereitzustellen, welche der tatsächlichen Größe, gegebenenfalls bis auf einen Unterschied in Form eines konstanten globalen Offsetwerts, nahe kommen kann.

Es wird darauf hingewiesen, dass sich die hier verwendete Formulierung „tatsächlich“ bzw. „tatsächliche Größe“ auf die Größe ohne Messfehler, und damit auf eine Größe bezieht, welche im Rahmen einer idealisierten Messung ohne Messfehlereinträge in den Teilbereichen des Parameterbereichs zur Verfügung stellbar ist.

Im Folgenden werden weitere mögliche Ausführungsformen und Details des Verfahrens beschrieben.

Für das Durchführen der Approximation ist gemäß einer Ausführungsform vorgesehen, den Parameterbereich in eine endliche Anzahl an Stützstellen zu diskretisieren. Auf diese Weise kann das Verfahren mit einer geeigneten Auswerteeinrichtung durchgeführt werden.

Die Größe kann von einem Parameter, aber auch von mehreren, zum Beispiel von zwei Parametern, abhängig sein. In einer solchen Ausführungsform umfasst der Parameterbereich die meh-

reren Parameter, und beziehen sich die Messwerte der Größe auf dazugehörige Parameterwerte der mehreren Parameter.

5 In einer weiteren Ausführungsform ist der mindestens eine Parameter eine Ortskoordinate. Der Parameterbereich kann zum Beispiel zwei Parameter in Form von Ortskoordinaten umfassen. Bei den zwei Ortskoordinaten kann es sich zum Beispiel um Koordinaten eines zweidimensionalen orthogonalen Koordinatensystems handeln. In einer solchen Ausgestaltung kann der Parameterbereich zum Beispiel ein Bildfeld darstellen. Hierbei können sich die Messwerte der Größe auf Feld- bzw. Bildpunkte des Bildfelds mit dazugehörigen Bildpunktkoordinaten beziehen.

15 Für das Verfahren können auch andere Parameter zur Anwendung kommen. Beispielsweise kann es sich bei dem mindestens einen Parameter um eine Zeit handeln. Ein weiteres Beispiel ist ein Parameterbereich umfassend eine Zeit und eine oder mehrere Ortskoordinaten.

20 In einer weiteren Ausführungsform ist mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen die Größe jeweils um den gleichen Wert in den dazugehörigen Teilbereichen veränderbar. Diese Ausführungsform kann zur Anwendung kommen, wenn konstante bzw. im Wesentlichen konstante Messfehler (Versetzungen bzw. Offsets) in Teilbereichen des Parameterbereichs vorliegen, mit welchen sämtliche Messwerte der Größe in den betreffenden Teilbereichen behaftet sind. Durch die Verwendung der Teilbereichsfunktionen mit der vorgenannten Eigenschaft ist es möglich, den Effekt der Offsetfehler nachzubilden und infolgedessen Mittelwerte der Größe in den Teilbereichen des Parameterbereichs zuverlässig zu rekonstruieren. Anders ausgedrückt, kann die in den Teilbereichen individuell vorliegende konstante bzw. im Wesentlichen konstante Verfälschung von Messwerten der Größe infolge von Messfehlern unterdrückt werden.

35

Die bei dem Verfahren verwendete glatte Funktion kann mehrere Basisfunktionen umfassen. Bei der glatten Funktion kann es sich zum Beispiel um eine Polynomfunktion handeln. Es ist möglich, einfache Polynom-Basisfunktionen einzusetzen.

5

In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Korrektur ein Bilden von korrigierten Werten der Größe. Hierbei können fehlerbehaftete Messwerte der Größe durch die entsprechenden korrigierten Werte der Größe ersetzt werden. Die korrigierten Werte der Größe, welche auch als rekonstruierte Werte bezeichnet werden können, können tatsächlichen, d.h. ohne Messfehler behafteten Werten der Größe nahe kommen und diesen im Wesentlichen entsprechen.

15 In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Approximation eine Bestimmung von Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen. Des Weiteren werden Messwerte der Größe unter Verwendung der Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen korrigiert. Auf diese Weise können korrigierte Werte der Größe gebildet werden, mit welchen wie vorstehend beschrieben fehlerbehaftete Messwerte der Größe ersetzt werden können. Über die Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen können Einträge bzw. Gewichtungen derselben, und damit eine Stärke von Messfehlern in den einzelnen Teilbereichen wiedergegeben werden. Die Verwendung der Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen macht es daher möglich, Messfehler auf zuverlässige Weise zu bereinigen bzw. zu unterdrücken. Hierbei können Mittelwerte der Größe in den Teilbereichen des Parameterbereichs zuverlässig rekonstruiert werden.

30

In Bezug auf die Verwendung von Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen können ferner folgende Ausgestaltungen des Verfahrens zur Anwendung kommen.

35 In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Approximation eine Bildung einer Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktion, eine Bildung

der Pseudoinversen der Funktionenmatrix, und eine Multiplikation der Pseudoinversen der Funktionenmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der Größe zur Bildung eines Koeffizientenvektors. Der Koeffizientenvektor umfasst Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen und Koeffizienten der Basisfunktionen der glatten Funktion. Mit Hilfe der vorgenannten Schritte lässt sich der Forderung nach einer Annäherung an die Messwerte der Größe durch die glatte Funktion und die Teilbereichsfunktionen mit einer minimalen Abweichung entsprechen. Hierdurch können die Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen, mit welchen Messwerte der Größe korrigiert werden können, auf zuverlässige Weise bereitgestellt werden. Die Korrektur kann wie im Folgenden beschrieben erfolgen.

In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Korrektur eine Multiplikation einer Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit einem Vektor aus (mittels der Approximation ermittelten) Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen zur Bildung eines Produkts, und eine Subtraktion des Produkts bis auf dessen Mittelwert von dem Vektor aus Messwerten der Größe. Durch diese Vorgehensweise können korrigierte Werte der Größe gebildet werden, welche der tatsächlichen Größe im Wesentlichen entsprechen können. Bei dem Produkt kann es sich um die Einträge bzw. Gewichtungen sämtlicher angenäherter Teilbereichsfunktionen handeln. Der dazugehörige Mittelwert kann auch als Gleichanteil bezeichnet werden. Der Formulierung „bis auf dessen Mittelwert“ kann entsprochen werden, indem der Mittelwert des Produkts von dem Produkt subtrahiert wird, und dieser Term von dem Vektor aus Messwerten der Größe subtrahiert wird.

Durch den Abzug des Mittelwerts des Produkts kann sichergestellt werden, dass vorwiegend relative, also von Teilbereich zu Teilbereich des Parameterbereichs vorliegende Unterschiede in den Messwerten der Größe korrigiert werden, und im Wesentlichen keine globale bzw. einheitliche Größenkorrektur über

sämtliche Teilbereiche erfolgt. Dadurch können die korrigierten Werte der Größe der tatsächlichen Größe nahe kommen.

In einer weiteren Ausführungsform werden mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen verwendet. Hierbei handelt es sich um Teilbereichsfunktionen, welche bezogen auf den Parameterbereich den Mittelwert Null besitzen. Derartige Teilbereichsfunktionen können gebildet werden, indem von jeder der mittelwertbehafteten Teilbereichsfunktionen jeweils der dazugehörige Mittelwert subtrahiert wird. Bei Verwendung von mittelwertfreien Teilbereichsfunktionen ist die oben beschriebene Subtraktion des Mittelwerts des Produkts (Mittelwert der gesamten Einträge der Teilbereichsfunktionen) implizit in der Approximation und Korrektur enthalten. Der Mittelwert des Produkts weist bei Verwendung von mittelwertfreien Teilbereichsfunktionen den Wert Null auf, so dass auch eine Subtraktion desselben entfallen kann. In Bezug auf den oben beschriebenen Korrekturschritt kann daher, sofern bei den anderen Schritten mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen zum Einsatz kommen, lediglich das Produkt von dem Vektor aus Messwerten der Größe subtrahiert werden.

Ein weiterer Vorteil der Verwendung von mittelwertfreien Teilbereichsfunktionen besteht darin, dass die Approximation der Messwerte der Größe eindeutig durchgeführt werden kann. Im Unterschied hierzu kann bei mittelwertbehafteten Teilbereichsfunktionen der Mittelwert der Einträge der Teilbereichsfunktionen doppelt in der verwendeten Menge aus Funktionen bzw. in der Funktionenmatrix enthalten sein, und zwar als Konstante in der glatten Funktion und als Summe der Teilbereichsfunktionen. Dies kann eine uneindeutige Approximation zur Folge haben.

Wie oben angegeben wurde, kann als glatte Funktion eine Polynomfunktion verwendet werden, welche einfache Polynom-Basisfunktionen umfassen kann. Zum Zwecke der Regularisierung und dadurch Verbesserung der Approximation kann des Weiteren

eine glatte Funktion zum Einsatz kommen, welche orthogonalisierte oder orthonormierte Basisfunktionen umfasst. Möglich ist auch eine Verwendung einer Polynomfunktion mit normierten Polynom-Basisfunktionen.

5

In einer weiteren Ausführungsform werden die Approximation und Korrektur in gemeinsamer Weise durchgeführt, indem eine Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktion gebildet wird, die Pseudoinverse der Funktionenmatrix gebildet wird, eine Teilmatrix aus der Pseudoinversen der Funktionenmatrix gebildet wird, wobei über die Teilmatrix Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen erzeugbar sind, eine Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit der Teilmatrix zum Bilden eines Produkts multipliziert wird, das Produkt von einer Identitätsmatrix zur Bildung einer Korrekturmatrix subtrahiert wird, und die Korrekturmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der Größe multipliziert wird. Diese Ausführungsform, mit deren Hilfe korrigierte Werte der Größe auf einfache Weise gebildet werden können, genügt ebenfalls der Forderung, eine Annäherung an die Messwerte der Größe mit einer minimalen Abweichung zu erzielen. Die Approximation und Korrektur basieren hierbei auf einer einfachen Multiplikation von Messwerten der Größe mit der Korrekturmatrix. In diesem Zusammenhang ist es ferner möglich, die einmal gebildete Korrekturmatrix jeweils zur Korrektur von Messwerten der Größe heranzuziehen, welche mit Hilfe verschiedener Messungen gewonnen werden.

Wie oben angegeben wurde, lässt sich das Verfahren derart durchführen, dass korrigierte Werte der Größe gebildet werden. In einer weiteren, zusätzlich oder alternativ durchführbaren Ausführungsform umfasst die Korrektur eine Bildung eines approximierten Verlaufs der Größe. Der approximierte Verlauf der Größe kann der tatsächlichen, d.h. ohne Messfehler behafteten Größe nahe kommen und dieser im Wesentlichen entsprechen. Es ist möglich, die Messwerte der Größe durch den approximierten Verlauf der Größe zu ersetzen. Auf diese Weise

kann zum Beispiel ein Verlauf der Größe über den gesamten interessierenden Parameterbereich rekonstruiert werden. Die Bildung des approximierten Verlaufs der Größe ermöglicht eine Eliminierung von Punktrauschen.

5

Im Rahmen der Korrektur kann ferner eine Interpolation und/oder Extrapolation erfolgen. Eine weitere Ausführungsform schlägt hierzu vor, dass die Korrektur eine Bildung von wenigstens einem Ergänzungswert der Größe umfasst, wobei der Ergänzungswert der Größe zu einem Wert des mindestens einen Parameters gehört, für welchen kein Messwert der Größe vorliegt. Das Bereitstellen des wenigstens eines Ergänzungswerts der Größe kann auf der Grundlage eines approximierten Verlaufs der Größe erfolgen.

15

Das Bilden eines approximierten Verlaufs der Größe kann mit Hilfe der im Folgenden beschriebenen Ausführungsform erfolgen, in welcher die Approximation und Korrektur ebenfalls in gemeinsamer Weise durchgeführt werden. Hierzu ist vorgesehen, eine Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktion zu bilden, die Pseudoinverse der Funktionenmatrix zu bilden, eine Teilmatrix aus der Pseudoinversen der Funktionenmatrix zu bilden, wobei über die Teilmatrix Koeffizienten der Basisfunktionen der glatten Funktion erzeugbar sind, eine Matrix aus Basisfunktionen der glatten Funktion mit der Teilmatrix zur Bildung einer Verlaufserzeugungsmatrix zu multiplizieren, und die Verlaufserzeugungsmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der Größe zu multiplizieren. Diese Ausführungsform, mit deren Hilfe ein approximierter Verlauf der Größe auf einfache Weise gebildet werden kann, wird ebenfalls der Forderung gerecht, eine Annäherung an die Messwerte der Größe mit einer minimalen Abweichung zu erzielen. Die Approximation und Korrektur basieren hierbei auf einer einfachen Multiplikation von Messwerten der Größe mit der Verlaufserzeugungsmatrix. Es ist möglich, die einmal gebildete Verlaufserzeugungsmatrix jeweils heranzuziehen, um approximierte Verläufe der Größe aus Messwerten der

Größe zu bilden, welche mit Hilfe verschiedener Messungen gewonnen werden.

In einer Weiterbildung des Verfahrens bezieht sich die bei
5 dem Verfahren durchgeführte Messung auf mehrere separate, nicht überlappende Teilbereiche und zusätzlich wenigstens einen weiteren Teilbereich des Parameterbereichs, welcher mit wenigstens einem der separaten, nicht überlappenden Teilbereiche überlappt. In Bezug auf diese Verfahrensvariante können
10 unterschiedliche Ausgestaltungen in Betracht kommen.

Es ist zum Beispiel möglich, dass wenigstens ein Teilbereich der bei dem Verfahren berücksichtigten disjunkten Teilbereiche ein vereinigter Teilbereich ist, für welchen gemeinsame
15 Messwerte der Größe bereitgestellt werden. Ein solcher vereinigter Teilbereich kann aus überlappenden Teilbereichen zusammengesetzt werden. Gemeinsame Messwerte der interessierenden Größe können auf der Grundlage einer geeigneten Vorverarbeitung bzw. Korrektur von zunächst in den einzelnen überlap-
20 penden Teilbereichen gewonnenen Messwerten bereitgestellt werden. Hierfür kann zum Beispiel ein Stitching-Verfahren durchgeführt werden. Nachfolgend können der vereinigte Teilbereich und die dazugehörigen gemeinsamen Messwerte bei der mit Hilfe der glatten Funktion und der Teilbereichsfunktionen
25 durchgeführten Korrektur bzw. Approximation zur Anwendung kommen. Hierbei kann dem vereinigten Teilbereich eine entsprechende Teilbereichsfunktion zugeordnet werden, und kann der Korrekturablauf wie oben beschrieben bzw. gemäß einer der oben beschriebenen Ausführungsformen (beispielsweise Bildung
30 von korrigierten Werten der Größe, Bestimmung und Verwendung von Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen zur Korrektur, Verwendung der Pseudoinversen der Funktionenmatrix, der Korrekturmatrix, der Verlaufserzeugungsmatrix usw.) durchgeführt werden. Die dem vereinigten Teilbereich zugeordnete Teilbe-
35 reichsfunktion ist derart gewählt, dass hiermit eine individuelle Veränderung der Größe hervorrufbar bzw. die Größe je-

weils um den gleichen Wert in dem Teilbereich veränderbar ist.

Es können auch mehrere vereinigte Teilbereiche gebildet, hierfür Messwerte bereitgestellt, und diese bei der Korrektur und Approximation berücksichtigt werden. Dieser Fall kann in Betracht kommen, wenn sich die Messung auf mehrere weitere Teilbereiche bezieht, welche mit anderen Teilbereichen überlappen.

In einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens, in welcher Messwerte der Größe in wenigstens einem weiteren Teilbereich des Parameterbereichs bereitgestellt werden, wobei der weitere Teilbereich mit wenigstens einem der separaten und nicht überlappenden Teilbereiche überlappt, wird die Approximation mit einer weiteren, dem weiteren Teilbereich zugeordneten Teilbereichsfunktion durchgeführt, mit deren Hilfe eine individuelle Veränderung der Größe in dem weiteren Teilbereich des Parameterbereichs hervorrufbar ist. Die weitere Teilbereichsfunktion kann derart gewählt sein, dass hiermit die interessierende Größe jeweils um den gleichen Wert in dem betreffenden Teilbereich veränderbar ist. Bei mehreren weiteren Teilbereichen können in entsprechender Weise mehrere weitere Teilbereichsfunktionen zum Einsatz kommen.

Im Vergleich zu der zuvor beschriebenen Variante erfolgt somit keine Vorverarbeitung bzw. Vereinigung von Teilbereichen. Stattdessen wird ein weiterer überlappender Teilbereich wie die übrigen Teilbereiche behandelt. Der Korrekturablauf kann hierbei wie oben beschrieben bzw. gemäß einer der oben beschriebenen Ausführungsformen (beispielsweise Bildung von korrigierten Werten der Größe, Bestimmung und Verwendung von Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen zur Korrektur, Verwendung der Pseudoinversen der Funktionenmatrix, der Korrekturmatrix, der Verlaufserzeugungsmatrix usw.) durchgeführt werden. In dieser Ausgestaltung kann in einem Überlappungsbereich von überlappenden Teilbereichen eine zweifache, oder

bei mehr als zwei überlappenden Teilbereichen eine mehrfache Approximation erfolgen.

Das Verfahren bzw. dessen unterschiedliche Ausführungsformen können im Hinblick auf unterschiedliche Größen zur Anwendung kommen. In Betracht kommt zum Beispiel eine optische Größe. Hierbei kann der Parameterbereich zwei Ortskoordinaten umfassen, und ein Bildfeld darstellen.

Bei der optischen Größe kann es sich zum Beispiel um eine Verzeichnungsgröße handeln, mit welcher eine in einem Bildfeld auftretende Verzeichnung, zum Beispiel eine kissenförmige oder tonnenförmige Verzeichnung, wiedergegeben werden kann. Mit Hilfe des Verfahrens können fehlerbehaftete Messwerte der Verzeichnungsgröße, welche in mehreren bzw. disjunkten Teilbereichen des Bildfelds gewonnen werden, wie oben angegeben korrigiert werden. Hierbei kann es beispielsweise in Betracht kommen, die Verzeichnung über das gesamte Bildfeld zu rekonstruieren, indem zum Beispiel ein approximierter Verlauf der Verzeichnungsgröße über das Bildfeld und/oder Ergänzungswerte der Größe zum Zwecke der Interpolation und/oder Extrapolation gebildet werden.

Ein weiteres Beispiel für eine optische Größe ist ein Wellenfrontfehler. Der Wellenfrontfehler kann zum Beispiel in Form eines Koeffizienten zu einem Zernike-Polynom einer Wellenfrontentwicklung vorliegen. Hierbei kann es sich zum Beispiel um einen eine Verzeichnung bzw. einen, ggf. lokalen, Bildversatz wiedergebenden Zernike-Koeffizienten zu Zernike-Polynom Z_2 oder Z_3 , oder um einen einen Fokusversatz wiedergebenden Zernike-Koeffizienten zu Zernike-Polynom Z_4 handeln. Bei den hier betrachteten Zernike-Polynomen Z_2 , Z_3 , Z_4 handelt es sich um Zernike-Polynome gemäß der Noll'schen Indizierung. Das Verfahren kann zur Anwendung kommen, um fehlerbehaftete Messwerte des Wellenfrontfehlers, welche in disjunkten Teilbereichen eines Bildfelds bereitgestellt werden, wie oben angegeben zu korrigieren.

In Bezug auf eine optische Größe ist gemäß einer weiteren Ausführungsform vorgesehen, dass die Messung eine mit Hilfe eines ortsauflösenden Sensors durchgeführte Strahlungsmessung ist. Bei dem ortsauflösenden Sensor kann es sich zum Beispiel um einen elektronischen Sensor mit einer Mehrzahl an strahlungsempfindlichen Sensorelementen bzw. Pixeln handeln. Der Sensor kann zum Beispiel in Form eines CCD-Sensors (Charge-Coupled Device) mit strahlungsempfindlichen Fotodioden verwirklicht sein. Messsignale des Sensors können, nach einer entsprechenden Weiterverarbeitung bzw. Auswertung, in ortsabhängige und sich auf Bildpunkte eines Bildfelds beziehende Messwerte der optischen Größe übersetzt werden.

Das Bereitstellen von Messwerten der optischen Größe an Bildpunkten in mehreren bzw. disjunkten Teilbereichen eines Bildfelds unter Verwendung eines ortsauflösenden Sensors kann auf unterschiedliche Weise verwirklicht sein. Beispielsweise kann es in Betracht kommen, den Sensor für die Messung an unterschiedlichen Messpositionen anzuordnen. Hierbei werden mit Hilfe des Sensors nacheinander mehrere Teilmessungen durchgeführt, und wird der Sensor dazwischen zu den einzelnen Messpositionen bewegt. Bei einer solchen Vorgehensweise können Messfehler, durch welche Messwerte der optischen Größe in einzelnen Teilbereichen des Bildfelds unterschiedlich verfälscht werden können, eine Folge von Fehlpositionierungen des Sensors sein.

Möglich ist es auch, für die Messung einen ortsauflösenden Sensor zu verwenden, welcher mehrere Teilsensoren mit nicht aneinander grenzenden und nicht überlappenden Erfassungsbereichen aufweist. Auch auf diese Weise können Messwerte der optischen Größe an Bildpunkten in disjunkten Teilbereichen eines Bildfelds bereitgestellt werden. Hierbei können Messfehler, durch welche Messwerte der optischen Größe in einzelnen Teilbereichen des Bildfelds unterschiedlich verfälscht

sein können, durch Lagefehler von Teilsensoren des Sensors verursacht sein.

5 Neben einem elektronischen Sensor bzw. CCD-Sensor können auch andere ortsauflösende Sensoren zum Einsatz kommen. Ein Beispiel ist ein Sensor, welcher eine lichtempfindliche Schicht, beispielsweise eine fotografische Platte oder einen Film, aufweist. Nach der Strahlungsmessung bzw. Belichtung der lichtempfindlichen Schicht kann eine Entwicklung derselben
10 erfolgen, und können im Rahmen einer Analyse der Schicht ortsabhängige Messwerte der optischen Größe an Bildpunkten eines Bildfelds bereitgestellt werden. Ein Bereitstellen von Messwerten der optischen Größe in disjunkten Teilbereichen des Bildfelds kann zum Beispiel dadurch erfolgen, dass sich
15 die Analyse nur auf Teilbereiche der Schicht bezieht, die Schicht nur in Teilbereichen bestrahlt wird, oder eine in Teilbereiche unterteilte Schicht verwendet wird.

Anstelle einer optischen Größe kann das Verfahren auch in Bezug
20 auf andere, in mehreren bzw. disjunkten Teilbereichen eines Parameterbereichs gemessene Größen zur Anwendung kommen. Ein mögliches Beispiel ist eine Höhe bzw. eine vertikale Ausdehnung eines Prüflings. Hierbei kann es in ebenfalls Betracht kommen, mit Hilfe einer Messung entsprechende ortsabhängige Messwerte in disjunkten Teilbereichen eines zweidi-
25 mensionalen Bildfelds bereitzustellen, und Messfehler durch Durchführen des oben beschriebenen Verfahrens zu korrigieren. Die Messung der Höhe kann zum Beispiel mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops oder mit Hilfe eines Oberflächeninterferometers durchgeführt werden.
30

Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Justage einer Abbildungsoptik eines optischen Systems vorgeschlagen. Hierbei wird unter Verwendung eines ortsauflösenden Sensors, welcher mit einer von der Abbildungsoptik
35 kommenden Strahlung bestrahlbar ist, das oben beschriebene bzw. gemäß einer der vorstehend beschriebenen Ausführungsfor-

men ausgestaltete Verfahren zur Ermittlung einer korrigierten optischen Größe durchgeführt. Des Weiteren wird die Abbildungsoptik auf der Grundlage der korrigierten optischen Größe justiert.

5

Durch das Bereitstellen von Messwerten der optischen Größe in mehreren bzw. disjunkten Teilbereichen eines Bildfelds, was wie oben angegeben zum Beispiel durch Messen mit einem Sensor an unterschiedlichen Messpositionen oder Verwendung eines
10 Sensors mit mehreren Teilsensoren erfolgen kann, ist eine kostengünstige Messung möglich. Die Korrektur von hiermit einhergehenden Messfehlern ermöglicht es, die Justage der Abbildungsoptik mit einer hohen Zuverlässigkeit und Genauigkeit durchführen. Mit Hilfe der korrigierten optischen Größe können
15 die Abbildungseigenschaften der Abbildungsoptik genau wiedergegeben, und dadurch im Rahmen der Justage berücksichtigt und optimiert werden. Der Einfluss von Messfehlern, was zu einer Verfälschung von Messwerten der optischen Größe führt, kann durch die Korrektur weitgehend eliminiert werden.

20

Im Hinblick auf das Justageverfahren ist es möglich, die bei der Approximation und Korrektur verwendete glatte Funktion bzw. deren Basisfunktionen auf der Kenntnis der optischen Eigenschaften der Abbildungsoptik festzulegen.

25

Das Ermitteln der korrigierten optischen Größe, auf deren Grundlage die Justage durchgeführt wird, kann zum Beispiel eine Bildung von korrigierten Werten der optischen Größe umfassen. Zusätzlich oder alternativ kann die Bildung eines approximierten Verlaufs der optischen Größe und/oder die Bildung
30 wenigstens eines Ergänzungswerts der optischen Größe vorgesehen sein.

Der ortsauflösende Sensor kann ein Bestandteil des optischen
35 Systems sein oder nicht. In der zweiten Variante kann der Sensor zum Beispiel im Rahmen eines Aufbaus des optischen Systems zum Einsatz kommen.

Mit Bezug auf die mit Hilfe des ortsauflösenden Sensors durchgeführte Strahlungsmessung kann es ferner in Betracht kommen, eine oder mehrere geeignete Teststrukturen bzw. Markierungen, auf deren Grundlage die ortsabhängigen Messwerte der optischen Größe bereitgestellt werden können, in das teilbereichsweise bzw. disjunkt gemessene Bildfeld abzubilden. Zu diesem Zweck kann zum Beispiel ein Objekt, beispielsweise ein Retikel, zum Einsatz kommen, welches die Teststruktur(en) aufweist, und welches mit der verwendeten Strahlung bestrahlt wird. Über die Abbildungsoptik kann die von dem Objekt kommende Strahlung, d.h. ein transmittierter oder reflektierter Strahlungsanteil, zu dem ortsauflösenden Sensor geführt werden.

Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird eine Vorrichtung zur Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Parameter abhängigen Größe in einem Parameterbereich des mindestens einen Parameters vorgeschlagen. Die Vorrichtung weist eine Messeinrichtung auf, mit deren Hilfe Messwerte der Größe in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen des Parameterbereichs bereitstellbar sind. Die Vorrichtung weist ferner eine Auswerteeinrichtung zur Korrektur von Messwerten der Größe auf. Die Auswerteeinrichtung ist ausgebildet, die Korrektur unter Verwendung einer Approximation durchzuführen, in welcher Messwerte der Größe mit einer glatten Funktion und mit den Teilbereichen zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden. Mit Hilfe der glatten Funktion ist ein Verlauf der Größe über den Parameterbereich wiedergebar. Mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen ist eine individuelle Veränderung der Größe in den Teilbereichen des Parameterbereichs hervorruftbar.

Bei der Vorrichtung können Messwerte der Größe in mehreren disjunkten Teilbereichen des Parameterbereichs bereitgestellt werden. Daher kann die Messeinrichtung einen kostengünstigen Aufbau besitzen. Ein hiermit verbundener möglicher Effekt,

dass die Messwerte der Größe in einzelnen Teilbereichen des Parameterbereichs jeweils eigene und von anderen Teilbereichen unabhängige Messfehler aufweisen, kann durch die Korrektur mit Hilfe der Auswerteeinrichtung unterdrückt werden.

5

Es wird darauf hingewiesen, dass oben mit Bezug auf das Korrekturverfahren und das Justageverfahren beschriebene Aspekte und Details auch bei der Vorrichtung zur Anwendung kommen können. In diesem Zusammenhang wird ferner auf die Möglichkeit hingewiesen, die Vorrichtung im Rahmen der oben beschriebenen Justage einer Abbildungsoptik eines optischen Systems einzusetzen.

Des Weiteren wird auf die Möglichkeit hingewiesen, mit Hilfe des Verfahrens bzw. der Vorrichtung mehrere korrigierte Größen in einem gemeinsamen Parameterbereich zu ermitteln. Hierbei können Messwerte der mehreren Größen in mehreren bzw. disjunkten Teilbereichen des Parameterbereichs bereitgestellt werden, und kann für jede der Größen eine eigene separate Fehlerkorrektur (mit jeweils eigenständiger Approximation), wie sie oben beschrieben wurde, durchgeführt werden. Für jede der betrachteten Größen können zum Beispiel korrigierte Werte, ein approximierter Verlauf und/oder wenigstens ein Ergänzungswert bereitgestellt werden. Dies kann zum Beispiel für optische Größen wie die oben beschriebenen Wellenfrontfehler bzw. Koeffizienten zu Zernike-Polynomen einer Wellenfrontentwicklung in Betracht kommen.

Bei mehreren interessierenden Größen, insbesondere optischen Größen wie Wellenfrontfehlern, kann es zu einem Übersprechen zwischen verschiedenen Größen kommen. Hierbei können Fehlerursachen für Mess- bzw. Offsetfehler, welche sich auf eine erste Größe beziehen, auch eine Messverfälschung von wenigstens einer weiteren zweiten Größe hervorrufen. Beispielsweise können Fehlpositionierungen eines Sensors, durch welche Messfehler bei der Messung des einen Fokusversatz wiedergebenden Koeffizienten zu Zernike-Polynom Z4 hervorgerufen werden,

auch zu Messfehlern in Bezug auf den einen Bildversatz wiedergebenden Zernike-Koeffizienten zu Zernike-Polynom Z2 und/oder Z3 führen.

- 5 Das Übersprechen lässt sich unterdrücken, indem auf der Grundlage einer Fehlerkorrektur der ersten Größe, welche gemäß den obigen Ansätzen unter Verwendung einer Approximation erfolgt, eine zusätzliche Korrektur der zweiten Größe bzw. von Messwerten der zweiten Größe durchgeführt wird. Bei-
- 10 spielsweise kann die zusätzliche Korrektur der zweiten Größe basierend auf Koeffizienten von Teilbereichsfunktionen erfolgen, welche im Rahmen der Fehlerkorrektur der ersten Größe bestimmt werden. Die zusätzliche Korrektur der zweiten Größe kann vor oder nach einer, gemäß den obigen Ansätzen unter
- 15 Verwendung einer Approximation durchgeführten Fehlerkorrektur der zweiten Größe vorgesehen sein.

Des Weiteren wird auf die Möglichkeit hingewiesen, das Verfahren bzw. die Vorrichtung nicht nur zur Unterdrückung von

20 Offsetfehlern, sondern auch zur Unterdrückung von anderen, in Teilbereichen des Parameterbereichs individuell auftretenden Messfehlern einzusetzen. Hierzu werden geeignete Teilbereichsfunktionen verwendet, mit deren Hilfe das Auftreten derartiger Messfehler in den Teilbereichen des Parameterbe-

25 reichs nachgebildet werden kann.

In diesem Zusammenhang kann es zum Beispiel in Betracht kommen, Teilbereichsfunktionen zu verwenden, wobei sämtliche Teilbereichsfunktionen oder ein Teil bzw. eine Untergruppe

30 der Teilbereichsfunktionen zusammengesetzt einen glatten Verlauf über den Parameterbereich beschreiben. Um hierbei eine eindeutige Approximation zu ermöglichen, ist es denkbar, für sämtliche Teilbereichsfunktionen oder für die Untergruppe der Teilbereichsfunktionen modifizierte Teilbereichsfunktionen

35 bereitzustellen, deren Summe gleich Null ist. Das ist zum Beispiel möglich, indem von jeder dieser Teilbereichsfunktionen die skalierte Summe aller dieser Teilbereichsfunktionen

abgezogen wird, wobei der Skalierungsfaktor das Reziproke der Anzahl dieser Teilbereichsfunktionen ist. Alternativ zur Modifikation der Teilbereichsfunktionen sind weitere Vorgehensweisen denkbar, um eine eindeutige Approximation zu ermöglichen. Beispielsweise können die zugehörigen Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen vor Bildung des oben beschriebenen, zur Subtraktion von dem Vektor aus Messwerten der betrachteten Größe vorgesehenen Produkts (Produkt der Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit dem Vektor der Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen) entsprechend modifiziert werden.

Im Hinblick auf mehrere Wellenfrontfehler kann ferner die folgende Vorgehensweise in Betracht kommen.

Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Ermittlung von mehreren korrigierten und von zwei Ortskoordinaten abhängigen Wellenfrontfehlern in einem Bildfeld vorgeschlagen. Das Verfahren umfasst ein Durchführen einer Strahlungsmessung mit Hilfe eines ortsauflösenden Sensors, wobei Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen des Bildfelds bereitgestellt werden. Das Verfahren umfasst des Weiteren ein Durchführen einer gemeinsamen Korrektur von Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler unter Verwendung einer Approximation, in welcher Messwerte der Wellenfrontfehler mit mehreren, den Wellenfrontfehlern zugeordneten glatten Funktionen und mit den Teilbereichen des Bildfelds zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden. Mit Hilfe der glatten Funktionen sind Verläufe der mehreren Wellenfrontfehler über das Bildfeld wiedergebar. Mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen ist der Einfluss von fehlerhaften Positionierungen des ortsauflösenden Sensors auf die Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler wiedergebar.

Dieses Verfahren ermöglicht eine kostengünstige Messung, da Messwerte in mehreren Teilbereichen des Bildfelds bereitgestellt werden. Dies kann zur Folge haben, dass die Messwerte

aufgrund von fehlerhaften Positionierungen des Sensors Messfehler aufweisen. Anstatt eine separate Fehlerkorrektur durchzuführen, werden bei dem vorstehend beschriebenen Verfahren die interessierenden Wellenfrontfehler gemeinsam be-
5 handelt und simultan approximiert. Verwendet werden den betrachteten Wellenfrontfehlern zugeordnete glatte Funktionen, über welche Verläufe der Wellenfrontfehler über das Bildfeld wiedergebar sind, und den Teilbereichen des Bildfelds zugeordnete Teilbereichsfunktionen. Die Teilbereichsfunktionen
10 sind derart gewählt, dass hiermit tatsächliche Auswirkungen von fehlerhaften Positionierungen des Sensors auf die gemessenen Wellenfrontfehler nachgebildet bzw. modelliert werden. Auf diese Weise ist eine genaue und zuverlässige Korrektur der Wellenfrontfehler möglich, und können daher korrigierte
15 Wellenfrontfehler bereitgestellt werden, welche mit den tatsächlichen Wellenfrontfehlern gut übereinstimmen.

Die Wirkungen von fehlerhaften Positionierungen des ortsauflösenden Sensors auf die gemessenen Wellenfrontfehler lassen
20 sich zum Beispiel mit Hilfe einer Messung oder einer Simulation, beispielsweise durch Strahlpropagation, bestimmen. Hierauf basierend können die bei dem Verfahren verwendeten Teilbereichsfunktionen festgelegt werden. Mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen können zum Beispiel fehlerhafte Positionie-
25 rungen bezogen auf Translationsfreiheitsgrade und Rotationsfreiheitsgrade beschrieben werden. In Bezug auf ein orthogonales xyz-Koordinatensystem können dx-, dy-, dz-Translationen und drx-, dry-, drz-Rotationen modelliert werden.

30 Im Folgenden werden weitere mögliche Ausführungsformen und Details des Verfahrens zur gemeinsamen Korrektur mehrerer Wellenfrontfehler beschrieben. Hierbei können zu einem großen Teil dieselben bzw. übereinstimmende Merkmale und analoge Schritte zur Anwendung kommen, wie sie oben mit Bezug auf das
35 Verfahren zur Ermittlung einer einzelnen korrigierten Größe beschrieben wurden. In diesem Sinne wird auf die obige Beschreibung Bezug genommen.

Beispielsweise können die Wellenfrontfehler von einer Abbildungsoptik eines optischen Systems verursacht sein. Im Rahmen der Strahlungsmessung kann der ortsauflösende Sensor mit der von der Abbildungsoptik kommenden Strahlung bestrahlt werden. In diesem Zusammenhang wird ferner auf die Möglichkeit hingewiesen, das Verfahren zur Ermittlung der mehreren korrigierten Wellenfrontfehler durchzuführen, und hierauf basierend die Abbildungsoptik zu justieren.

Die mit Hilfe des Verfahrens korrigierten Wellenfrontfehler können zum Beispiel in Form von Koeffizienten zu Zernike-Polynomen einer Wellenfrontentwicklung vorliegen. Mit Hilfe des Verfahrens können zum Beispiel die Zernike-Koeffizienten zu den Zernike-Polynomen Z_2 , Z_3 und Z_4 in gemeinsamer Weise korrigiert werden.

In einer weiteren Ausführungsform wird der ortsauflösende Sensor an unterschiedlichen Messpositionen angeordnet. Messfehler können hierbei durch Fehlpositionierungen des Sensors verursacht sein.

Möglich ist es auch, dass der ortsauflösende Sensor mehrere Teilsensoren aufweist. Hierbei können fehlerhafte Positionierungen und dadurch Messfehler eine Folge von Lagefehlern von Teilsensoren des Sensors sein.

Die verwendeten glatten Funktionen können jeweils mehrere Basisfunktionen umfassen. Bei den glatten Funktionen kann es sich zum Beispiel um Polynomfunktionen handeln.

In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Korrektur eine Bildung von korrigierten Werten der mehreren Wellenfrontfehler. Hierbei können fehlerbehaftete Messwerte der Wellenfrontfehler durch die entsprechenden korrigierten Werte, welche auch als rekonstruierte Werte bezeichnet werden können, ersetzt werden.

In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Approximation eine Bestimmung von Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen. Des Weiteren werden Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler unter Verwendung der Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen korrigiert. Auf diese Weise können korrigierte Werte zum Ersetzen von fehlerbehafteten Messwerten der Wellenfrontfehler gebildet werden.

Oben genannte Verfahrensvarianten, in welchen Komponenten wie beispielsweise eine Funktionenmatrix bzw. deren Pseudoinverse verwendet werden, können in analoger Weise zur Anwendung kommen. Mögliche Ausführungsformen werden im Folgenden näher beschrieben.

In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Approximation eine Bildung einer Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktionen, eine Bildung der Pseudoinversen der Funktionenmatrix, und eine Multiplikation der Pseudoinversen der Funktionenmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler zur Bildung eines Koeffizientenvektors. Der Koeffizientenvektor umfasst Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen und Koeffizienten der Basisfunktionen der glatten Funktionen. Auf diese Weise lässt sich der Forderung nach einer Annäherung an die Messwerte der Wellenfrontfehler durch die glatten Funktionen und die Teilbereichsfunktionen mit einer minimalen Abweichung entsprechen, und können Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen zuverlässig bereitgestellt werden.

In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Korrektur eine Multiplikation einer Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit einem Vektor aus (mittels der Approximation ermittelten) Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen zur Bildung eines Produkts, und eine Subtraktion des Produkts bis auf dessen Mittelwert von dem Vektor aus Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler. Auf diese Weise können korrigierte Werte der

Wellenfrontfehler gebildet werden, welche den tatsächlichen Wellenfrontfehlern im Wesentlichen entsprechen können.

Bei dem Produkt kann es sich um die Einträge bzw. Gewichtung-
5 gen sämtlicher angenäherter Teilbereichsfunktionen handeln.
Der Formulierung „bis auf dessen Mittelwert“ kann entsprochen
werden, indem der Mittelwert des Produkts von dem Produkt
subtrahiert wird, und dieser Term von dem Vektor aus Messwer-
ten der mehreren Wellenfrontfehler subtrahiert wird. Hier-
10 durch kann erzielt werden, dass vorwiegend relative, also von
Teilbereich zu Teilbereich des Bildfelds vorliegende und auf
Messfehlern beruhende Unterschiede in den Messwerten der Wel-
lenfrontfehler korrigiert werden. Eine einheitliche bzw. glo-
bale Korrektur über sämtliche Teilbereiche des Bildfelds wird
15 daher vermieden.

In einer weiteren Ausführungsform werden mittelwertfreie
Teilbereichsfunktionen verwendet. Hierbei handelt es sich um
Teilbereichsfunktionen, welche bezogen auf das Bildfeld den
20 Mittelwert Null besitzen. Solche Teilbereichsfunktionen kön-
nen gebildet werden, indem von jeder der mittelwertbehafteten
Teilbereichsfunktionen jeweils der dazugehörige Mittelwert
subtrahiert wird. Der Einsatz von mittelwertfreien Teilbe-
reichsfunktionen ermöglicht eine eindeutige Approximation und
25 macht es möglich, dass die oben beschriebene Subtraktion des
Mittelwerts des Produkts implizit in der Approximation und
Korrektur enthalten ist. Das Produkt weist hierbei den Mit-
telwert Null auf, wodurch die Subtraktion entfallen kann. In
Bezug auf den oben beschriebenen Korrekturschritt kann daher,
30 sofern mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen verwendet wer-
den, lediglich das Produkt von dem Vektor aus Messwerten der
mehreren Wellenfrontfehler subtrahiert werden.

Darüber hinaus sind folgende weitere Ausführungsformen denk-
35 bar, welche eine eindeutige Approximation ermöglichen. Sollen
beispielsweise durch alle oder einen Teil der Teilbereichs-
funktionen die Wirkungen von Fehlpositionierungen eines Sen-

sors bezüglich eines bestimmten Freiheitsgrads wiedergegeben werden, wobei das Ausmaß der Fehlpositionierung der Einfachheit halber für jede Teilbereichsfunktion gleich groß gewählt sein kann, können für diese Teilbereichsfunktionen modifizierte Teilbereichsfunktionen bereitgestellt werden, deren Summe gleich Null ist. Das ist möglich, indem von jeder dieser Teilbereichsfunktionen die skalierte Summe aller dieser Teilbereichsfunktionen abgezogen wird, wobei der Skalierungsfaktor das Reziproke der Anzahl dieser Teilbereichsfunktionen ist. Dadurch kann erreicht werden, dass durch diese Teilbereichsfunktionen nur Unterschiede in der Positionierung des Sensors bezüglich dieses Freiheitsgrads erfasst werden, jedoch keine globale Fehlpositionierung. Alternativ zur Modifikation der Teilbereichsfunktionen kann dies erreicht werden, indem die zugehörigen Koeffizienten vor Bildung des oben beschriebenen, zur Subtraktion von dem Vektor aus Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler vorgesehenen Produkts (Produkt der Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit dem Vektor der Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen) entsprechend modifiziert werden.

In einer weiteren Ausführungsform werden die Approximation und Korrektur in gemeinsamer Weise durchgeführt, indem eine Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktionen gebildet wird, die Pseudoinverse der Funktionenmatrix gebildet wird, eine Teilmatrix aus der Pseudoinversen der Funktionenmatrix gebildet wird, wobei über die Teilmatrix Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen erzeugbar sind, eine Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit der Teilmatrix zum Bilden eines Produkts multipliziert wird, das Produkt von einer Identitätsmatrix zur Bildung einer Korrekturmatrix subtrahiert wird, und die Korrekturmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler multipliziert wird. Diese Ausführungsform, in welcher korrigierte Werte der mehreren Wellenfrontfehler auf einfache Weise gebildet werden können, wird ebenfalls der Forderung gerecht, eine Annäherung an die Messwerte der Wellenfrontfehler durch

die glatten Funktionen und die Teilbereichsfunktionen mit einer minimalen Abweichung zu erzielen.

Zusätzlich oder alternativ zur Bildung von korrigierten Werten der Wellenfrontfehler lässt sich eine weitere Ausführungsform durchführen, in welcher die Korrektur eine Bildung von approximierten Verläufen der mehreren Wellenfrontfehler umfasst. Dies ermöglicht eine Eliminierung von Punktrauschen. Es kann in Betracht kommen, die Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler durch die approximierten Verläufe zu ersetzen.

Des Weiteren kann eine Interpolation und/oder Extrapolation erfolgen, indem wenigstens ein Ergänzungswert von wenigstens einem der Wellenfrontfehler gebildet wird, wobei der Ergänzungswert zu Ortskoordinaten gehört, für welche kein Messwert des Wellenfrontfehlers vorliegt. Diese Ausführungsform kann auf der Grundlage eines approximierten Verlaufs des betreffenden Wellenfrontfehlers durchgeführt werden.

Das Bilden von approximierten Verläufen der mehreren Wellenfrontfehler kann mit Hilfe der folgenden Ausführungsform verwirklicht werden. Hierbei wird eine Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktionen gebildet, wird die Pseudoinverse der Funktionenmatrix gebildet, wird eine Teilmatrix aus der Pseudoinversen der Funktionenmatrix gebildet, wobei über die Teilmatrix Koeffizienten der Basisfunktionen der glatten Funktionen erzeugbar sind, wird eine Matrix aus Basisfunktionen der glatten Funktionen mit der Teilmatrix zur Bildung einer Verlaufserzeugungsmatrix multipliziert, und wird die Verlaufserzeugungsmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler multipliziert. Diese Ausführungsform, gemäß welcher approximierte Verläufe der mehreren Wellenfrontfehler auf einfache Weise gebildet werden können, wird ebenfalls der Forderung gerecht, eine Annäherung an die Messwerte der Wellenfrontfehler mit einer minimalen Abweichung zu verwirkli-

chen.

Hinsichtlich des vorstehend beschriebenen Verfahrens ist es denkbar, dass sich die Strahlungsmessung auf mehrere separate, nicht überlappende Teilbereiche und zusätzlich wenigstens einen weiteren Teilbereich des Bildfelds bezieht, welcher mit wenigstens einem der separaten, nicht überlappenden Teilbereiche überlappt. Hierbei kann es in Betracht kommen, dass wenigstens ein Teilbereich der bei dem Verfahren berücksichtigten disjunkten Teilbereiche ein vereinigter Teilbereich ist, für welchen gemeinsame Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler bereitgestellt werden, und für welchen eine zugeordnete Teilbereichsfunktion zur Wiedergabe des Einflusses fehlerhafter Sensorpositionierungen eingesetzt wird. Ein solcher vereinigter Teilbereich kann aus überlappenden Teilbereichen zusammengesetzt werden. Gemeinsame Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler des vereinigten Teilbereichs können basierend auf einer geeigneten Vorverarbeitung (zum Beispiel Stitching) von zunächst in den einzelnen überlappenden Teilbereichen gewonnenen Messwerten bereitgestellt werden. Nachfolgend können der vereinigte Teilbereich und die dazugehörigen Messwerte bei der mit Hilfe der glatten Funktionen und der Teilbereichsfunktionen durchgeführten gemeinsamen Korrektur bzw. Approximation zur Anwendung kommen. Es können auch mehrere vereinigte Teilbereiche gebildet und berücksichtigt werden.

Anstelle mit vereinigten Teilbereichen zu arbeiten, ist folgende Ausführungsform möglich. Hierbei werden Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler in wenigstens einem weiteren Teilbereich des Parameterbereichs bereitgestellt, wobei der weitere Teilbereich mit wenigstens einem der separaten und nicht überlappenden Teilbereiche überlappt, und wird die Approximation mit einer weiteren, dem weiteren Teilbereich zugeordneten Teilbereichsfunktion durchgeführt, mit deren Hilfe fehlerhafte Positionierungen des ortsauflösenden Sensors wiedergebbar sind. Bei mehreren weiteren Teilbereichen kommen in

entsprechender Weise mehrere zugehörige Teilbereichsfunktionen zum Einsatz.

Es kann ferner eine entsprechende Vorrichtung zur Ermittlung von mehreren korrigierten und von zwei Ortskoordinaten abhängigen Wellenfrontfehlern in einem Bildfeld zum Einsatz kommen. Die Vorrichtung weist einen ortsauflösenden Sensor zum Durchführen einer Strahlungsmessung auf, mit dessen Hilfe Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen des Bildfelds bereitstellbar sind. Die Vorrichtung weist ferner eine Auswerteeinrichtung zur gemeinsamen Korrektur von Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler auf. Die Auswerteeinrichtung ist ausgebildet, die Korrektur unter Verwendung einer Approximation durchzuführen, in welcher Messwerte der Wellenfrontfehler mit mehreren, den Wellenfrontfehlern zugeordneten glatten Funktionen und mit den Teilbereichen des Bildfelds zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden. Mit Hilfe der glatten Funktionen sind Verläufe der mehreren Wellenfrontfehler über das Bildfeld wiedergebar. Mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen ist der Einfluss von fehlerhaften Positionierungen des ortsauflösenden Sensors auf die Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler wiedergebar.

Oben mit Bezug auf das Verfahren zur gemeinsamen Korrektur mehrerer Wellenfrontfehler beschriebene Aspekte und Details können auch bei der Vorrichtung zur Anwendung kommen.

Die vorstehend erläuterten und/oder in den Unteransprüchen wiedergegebenen vorteilhaften Aus- und Weiterbildungen der Erfindung können – außer zum Beispiel in Fällen eindeutiger Abhängigkeiten oder unvereinbarer Alternativen – einzeln oder aber auch in beliebiger Kombination miteinander zur Anwendung kommen.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand der schematischen Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 ein optisches System umfassend eine Abbildungsoptik, mit deren Hilfe an einem Objekt reflektierte Strahlung zu einem Sensor geführt werden kann;

5

Figur 2 eine Darstellung von Messpositionen eines Sensors einschließlich lateraler Fehlpositionierungen und deren Auswirkung auf eine Messung eines Wellenfrontfehlers;

10 Figur 3 eine Darstellung eines Bildfelds mit einem Verzeichnungsgitter und mit Teilbereichen, welche Soll-Messpositionen und hiervon abweichende tatsächliche Messpositionen eines Sensors veranschaulichen;

15 Figur 4 eine weitere Darstellung des Bildfelds von Figur 3, wobei die zu den tatsächlichen Messpositionen gehörenden Teilbereiche des Bildfelds an den Soll-Messpositionen angeordnet sind;

20 Figur 5 eine weitere Darstellung von Messpositionen eines Sensors einschließlich vertikaler Fehlpositionierungen und deren Auswirkung auf eine Messung eines Wellenfrontfehlers;

Figur 6 ein weiteres optisches System umfassend eine Abbildungsoptik, mit deren Hilfe durch ein Objekt transmittierte Strahlung zu einem Sensor geführt werden kann;

25

Figur 7 eine Darstellung von Werten eines Wellenfrontfehlers an Bildpunkten in Teilbereichen eines Bildfelds, umfassend tatsächliche, gemessene und rekonstruierte Werte des Wellenfrontfehlers; und

30

Figuren 8 bis 10 Darstellungen eines Bildfelds mit unterschiedlichen Anordnungen von Teilbereichen.

35

Im Folgenden wird ein Konzept zur Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Parameter abhängigen Größe in

einem Parameterbereich des mindestens einen Parameters beschrieben. Hierbei werden auf der Grundlage einer Messung Messwerte der Größe in mehreren bzw. disjunkten, d.h. voneinander separaten und nicht überlappenden Teilbereichen des Parameterbereichs bereitgestellt. Dies kann dazu führen, dass die Messwerte der Größe in einzelnen Teilbereichen des Parameterbereichs mit Messfehlern behaftet sind, welche individuell in den Teilbereichen auftreten. Von Teilbereich zu Teilbereich kann eine Variation der Messfehler vorliegen. Eine solche Verfälschung der Messwerte der Größe vermindert deren Aussagekraft. Derartige Fehlerbeiträge können mit der hier beschriebenen Methode bereinigt oder zumindest teilweise bzw. zu einem wesentlichen Teil verringert werden.

Zur besseren Verdeutlichung wird das Korrekturverfahren beispielhaft im Zusammenhang mit optischen Systemen 100, 101 beschrieben, welche eine Abbildungsoptik 130 umfassen. Bei der zu korrigierenden Größe handelt es sich um eine ortsabhängige optische Größe, und zwar um einen von der Abbildungsoptik 130 verursachten Abbildungs- bzw. Wellenfrontfehler. Dies wird zum Teil anhand von Koeffizienten zu einem Zernike-Polynom einer Wellenfrontentwicklung erläutert. Betrachtet werden Zernike-Koeffizienten zu den Zernike-Polynomen Z2 und Z3, über welche ein Bildfehler in Form einer lateralen Verzeichnung bzw. eines Bildversatzes wiedergegeben wird, und um einen einen Fokusversatz wiedergebenden Zernike-Koeffizienten zum Zernike-Polynom Z4. Hierbei handelt es sich um die Zernike-Polynome gemäß der Nollschen Indizierung. Zur Vereinfachung der folgenden Beschreibung werden im Folgenden mit Z2, Z3, Z4 auch die Koeffizienten zu den entsprechenden Zernike-Polynomen bezeichnet.

Der dazugehörige Parameterbereich der Wellenfrontaberrationen umfasst zwei laterale orthogonale Ortskoordinaten, im Folgenden mit x und y bezeichnet, und stellt ein zweidimensionales Bildfeld 150 dar. Zur Vereinfachung der folgenden Beschreibung sind derartige und sich auf das Bildfeld 150 beziehende

Ortskoordinaten x , y , gegebenenfalls ergänzt um eine weitere vertikale orthogonale Ortskoordinate z , in den Figuren anhand von Achsen eines orthogonalen xy - bzw. xyz -Koordinatensystems angedeutet.

5

Figur 1 zeigt ein optisches System 100, welches zur Inspektion eines reflektierenden Objekts 121 eingesetzt werden kann. Bei dem Objekt 121 kann es sich um eine Lithographiemaske bzw. um ein Retikel handeln, welches mit dem Inspektionssystem 100 im Hinblick auf Defekte untersucht werden kann. Das Objekt 121 befindet sich in einer Objektebene 120.

Das System 100 weist Mittel zum Bestrahlen des Objekts 121 mit Strahlung 115 auf. Derartige Mittel sind in Figur 1 in Form eines Beleuchtungssystems 110 zusammengefasst. Eine weitere Komponente des Systems 100 ist eine Projektions- bzw. Abbildungsoptik 130, welche dazu dient, einen an dem Objekt 121 reflektierten Anteil der Strahlung 115 in Richtung einer Bildebene 140 zu führen. Auf diese Weise kann ein Objektfeld der Objektebene 120 mit Hilfe der Abbildungsoptik 130 in ein Bildfeld 150 der Bildebene 140 abgebildet werden. Das Bildfeld 150 kann zum Beispiel laterale Abmessungen im zweistelligen Zentimeterbereich, zum Beispiel von ca. 21cm x 28cm, aufweisen.

25

Im Bereich der Bildebene 140 ist ein ortsauflösender und zur Strahlungsmessung ausgebildeter Sensor 141 angeordnet, welcher mit der von der Abbildungsoptik 130 kommenden Strahlung 115 bestrahlbar ist. Der Sensor 141 kann ein elektronischer Sensor mit einer Anordnung aus strahlungsempfindlichen Sensorelementen bzw. Pixeln sein. In einer möglichen Ausgestaltung ist der Sensor 141 in Form eines CCD-Sensors (Charge-Coupled Device) mit strahlungsempfindlichen Fotodioden verwirklicht. Beispielsweise kann der Sensor 141 als zeitverzögernd integrierender CCD-Sensor (TDI-CCD, Time Delay and Integration Charge-Coupled Device) ausgebildet sein. Um Messsignale des Sensors 141 weiterzuverarbeiten bzw. auszuwerten, kommt eine

35

mit dem Sensor 141 gekoppelte Auswerteeinrichtung 160 zum Einsatz. Mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 160 können Messwerte einer interessierenden optischen Größe an Bildpunkten des Bildfelds 150 bereitgestellt werden.

5

Bei einer mit Hilfe des Systems 100 durchgeführten Maskeninspektion kann zum Beispiel Strahlung 115 mit derselben Wellenlänge eingesetzt werden, wie sie auch in einem Lithographieprozess verwendet wird. Daher kann dieser Vorgang als aktinische Untersuchung bezeichnet werden.

10

Bei dem System 100 erfolgt eine Strahlungserfassung nicht in dem gesamten Bildfeld 150 der Abbildungsoptik 130, sondern stattdessen in disjunkten Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 (vgl. Figur 3). Der Sensor 141 besitzt daher keinen vollflächigen und das gesamte Bildfeld 150 abdeckenden Erfassungsbereich, sondern weist eine Ausgestaltung mit mehreren zueinander beabstandeten ortsauflösenden Teilsensoren auf. Jeder Teilsensor weist eine entsprechende Teilanordnung aus Sensorelementen bzw. Fotodioden und damit einen entsprechenden Teilerfassungsbereich auf. Hierdurch sind ein kostengünstiger Aufbau des Sensors 141 und infolgedessen eine kostengünstige Messung möglich. Um trotz des unterteilten Sensoraufbaus einen zusammenhängenden Bereich des Objekts bzw. Retikels 121 untersuchen zu können, kann das Objekt 121 im Rahmen der Untersuchung in der Objektebene 120 entsprechend positioniert bzw. bewegt werden.

15

20

25

30

Jeder Teilsensor des Sensors 141 kann zum Beispiel einen Megapixel CCD-Chip mit einer Anzahl an Sensorelementen im Bereich von 10^6 aufweisen. Ein Beispiel ist eine Anordnung mit ca. 3000 x 3000 Pixeln.

35

In Figur 1 ist ein beispielhafter Aufbau des Sensors 141 mit vier Teilsensoren angedeutet, wobei die Teilsensoren entsprechend der Teilbereiche 151 von Figur 3 angeordnet sein können. Es ist möglich, dass der Sensor 141 eine andere bzw.

größere Anzahl an Teilsensoren aufweist, so dass auch eine entsprechende Anzahl an erfassbaren Teilfeldern 151 vorliegen kann.

5 In Bezug auf das System 100 ist es von Interesse, Abbildungs- bzw. Wellenfrontfehler, welche von der Abbildungsoptik 130 verursacht werden können, zu ermitteln. Für die Wellenfrontmessung kann eine Kombination aus Verzeichnungs- und Phase-Retrieval-Messtechnik zur Anwendung kommen. Die ermittelten
10 Abbildungsfehler können dazu verwendet werden, Justageprozesse zur Justage der Abbildungsoptik 130 zu entwickeln, so dass die Abbildungsfehler im Hinblick auf eine zuverlässige und genaue Funktionsweise des Systems 100 minimiert werden können.

15

Ein solches Ermitteln von Abbildungsfehlern zum Zwecke der Justage der Abbildungsoptik 130 kann bereits im Rahmen eines Aufbaus des Systems 100 vorgesehen sein. Zu diesem Zweck kann, anstelle des bei dem aufgebauten System 100 eingesetz-
20 ten Sensors 141 mit Teilsensoren, ein einzelner ortsauflösender Sensor 143 zur Strahlungserfassung verwendet werden. Um eine mit dem Sensor 141 durchgeführte Messung nachzubilden, können mit dem Sensor 143 die Positionen der Teilsensoren des Sensors 141 angefahren werden, und kann an diesen Messpositi-
25 onen jeweils eine Teilmessung der Strahlung 115 durchgeführt werden. Auf diese Weise kann eine Strahlungserfassung erneut lediglich in disjunkten Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 erfolgen. Die beispielhafte Darstellung von Figur 1 (und entsprechend Figur 3) kann daher auch als Veranschaulichung von
30 vier Messpositionen des Sensors 143 aufgefasst werden, wobei entsprechend der obigen Beschreibung eine andere bzw. größere Anzahl an Messpositionen in Betracht kommen kann. Es ist gegebenenfalls möglich, dass der Sensor 143 einen Erfassungs-
bereich mit anderen bzw. größeren lateralen Abmessungen besitzt
35 als die Teilsensoren des Sensors 141, so dass entsprechend andere bzw. größere Teilbereiche 151 des Bildfelds 150 erfassbar sind.

Zur Weiterverarbeitung bzw. Auswertung von Messsignalen des Sensors 143 kommt eine mit dem Sensor 143 gekoppelte Auswerteeinrichtung 160 zum Einsatz. Diese Auswerteeinrichtung 160
5 kann eine andere sein als die bei dem aufgebauten System 100 eingesetzte und dem Sensor 141 zugeordnete Auswerteeinrichtung 160. Dies kann in gleicher Weise auf das Beleuchtungssystem 110 sowie das Objekt bzw. Retikel 121 zutreffen. In diesem Zusammenhang ist es ferner möglich, bei einer Messung
10 mit dem Sensor 143 eine Strahlung 115 mit einer anderen Wellenlänge als bei einer Messung mit dem Sensor 141 einzusetzen.

Der Sensor 143 kann vergleichbar zu dem Sensor 141 in Form
15 eines elektronischen Sensors, zum Beispiel in Form eines CCD- bzw. TDI-CCD-Sensors, mit einer Anordnung aus strahlungsempfindlichen Sensorelementen bzw. Fotodioden verwirklicht sein. In entsprechender Weise kann der Sensor einen Megapixel CCD-Chip aufweisen. Auf der Grundlage einer an unterschiedlichen
20 Messpositionen des Sensors 143 durchgeführten Messung können, nach einer entsprechenden Auswertung von Messsignalen des Sensors 143 mit Hilfe der dazugehörigen Auswerteeinrichtung 160, Messwerte eines oder mehrerer interessierender Wellenfrontfehler an Bildpunkten in disjunkten Teilbereichen 151
25 des Bildfelds 150 bereitgestellt werden. Hierbei kann es sich zum Beispiel um die Zernike-Koeffizienten Z_2 , Z_3 und/oder Z_4 handeln. Im Hinblick auf die Koeffizienten Z_2 , Z_3 kann der Sensor 143 zum Beispiel ein Verzeichnungs-Messkopf sein.

30 Es wird darauf hingewiesen, dass im Rahmen einer Messung von Abbildungsfehlern ferner ein Objekt bzw. Retikel 121 mit geeigneten Teststrukturen (nicht dargestellt) zum Einsatz kommen kann, welche mittels der Abbildungsoptik 130 in das Bildfeld 150 abgebildet werden können. Durch eine Auswertung dazugehöriger Messsignale können die gewünschten Messwerte des
35 bzw. der interessierenden Wellenfrontfehler bereitgestellt werden.

In Bezug auf ein Erfassen eines Verzeichnungsfehlers kann zum Beispiel ein Raster von Markierungen zum Einsatz kommen. Eine Verzeichnung der Abbildungsoptik 130 bewirkt eine Verschiebung der in das Bildfeld 150 abgebildeten Markierungen. Aus der Position der abgebildeten Markierungen relativ zu deren Sollpositionen kann die Verzeichnung ermittelt werden.

Das Anordnen bzw. Positionieren des Sensors 143 an verschiedenen Messpositionen kann mit Hilfe einer geeigneten Positionierungseinrichtung, zum Beispiel mit Hilfe eines Positionierungstischs, durchgeführt werden (nicht dargestellt). Hierbei ist die Positionierungsgenauigkeit des Sensors 143 durch die Genauigkeit der Positionierungseinrichtung begrenzt. Anders ausgedrückt, kann die Messung aufgrund von Fehlpositionierungen des Sensors 143 beeinträchtigt sein. Hierbei kann es sich insbesondere um Fehlpositionierungen in den Translationsfreiheitsgraden, d.h. in der x-, y- sowie z-Richtung, handeln. Dies führt dazu, dass die bereitgestellten Messwerte eines Abbildungs- bzw. Wellenfrontfehlers in einzelnen Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 einen konstanten Messfehler bzw. Offset aufweisen können. Die Fehlpositionierungen können verschieden sein, so dass die individuell in Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 auftretenden Offsetfehler ebenfalls variieren, und sich hinsichtlich des Betrags und/oder des Vorzeichens voneinander unterscheiden können.

Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs zeigt Figur 2 unterschiedliche laterale Messpositionen des Sensors 143 mit Bezug auf die Bild- bzw. Bildsensorebene 140 und deren Auswirkung auf das Bereitstellen von Messwerten der eine Verzeichnung wiedergebenden Wellenfrontfehler Z2, Z3. In der Bildebene 140 ist des Weiteren eine für den Sensor 143 bzw. dessen Erfassungsbereich vorgesehene Soll-Messposition 145 angedeutet. Sofern sich der Sensor 143, wie in der mittleren Darstellung von Figur 2 gezeigt ist, an dessen Soll-Position 145 befindet, führt dies zu keiner Abweichung bei der Messung

der Wellenfrontfehler Z2, Z3. Eine laterale Fehlpositionierung in Form einer Abweichung dx bzw. dy des Sensors 143 mit Bezug auf die Soll-Messposition 145, wie es in der linken und rechten Darstellung von Figur 2 veranschaulicht ist, hat zur Folge, dass bei der Messung der Wellenfrontfehler Z2, Z3 jeweils eine Abweichung in Form eines Offsetfehlers auftritt.

In den Figuren 3 und 4 ist der Zusammenhang zwischen lateralen Positionierungsfehlern des Sensors 143 und die Messung verfälschenden Offsetfehlern in einer weiteren Darstellung veranschaulicht. Hier gezeigt sind ein Bildfeld 150 und ein in dem Bildfeld 150 vorliegender beispielhafter Abbildungsfehler in Form einer kissenförmigen Verzeichnung 165, welche anhand eines Gitters angedeutet ist. Weiter dargestellt sind vier Teilbereiche 151 des Bildfelds 150, in welchen mit Hilfe des an unterschiedlichen Messpositionen angeordneten Sensors 143 eine Strahlungsmessung durchgeführt wird.

Figur 3 zeigt sowohl die bei der Messung vorliegenden tatsächlichen Ist-Messpositionen des Sensors 143 mit den dazugehörigen erfassten Teilbereichen 151 als auch die Soll-Messpositionen des Sensors 143 mit den dazugehörigen Teilbereichen 151' (schraffiert angedeutet). Infolge von unterschiedlichen lateralen Fehlpositionierungen des Sensors 143 weisen die Teilbereiche 151 jeweils eine entsprechende Versetzung gegenüber den Teilbereichen 151' auf. Dies hat daher zur Folge, dass bei der Messung der Verzeichnung 165, ausgedrückt durch Zernike-Koeffizienten Z2 und Z3, unterschiedliche Offsetfehler auftreten.

In Figur 4 ist dies veranschaulicht, indem die Teilbereiche 151 von Figur 3 einschließlich der durchgezogenen Gitterlinien der Verzeichnung 165 zu den Soll-Messpositionen des Sensors 143 verschoben sind. Hierbei ist die in dem Bildfeld 150 vorliegende Verzeichnung 165 anhand von gestrichelten Gitterlinien angedeutet. Die in Figur 4 in den Teilbereichen 151 erkennbaren Versetzungen zwischen den durchgezogenen und den

gestrichelten Gitterlinien machen die bei der Messung auftretenden Offsetfehler deutlich.

Bei der Messung des einen Fokusversatz wiedergebenden Wellenfrontfehlers Z4 können vertikale Fehlpositionierungen des Sensors 143 zu einem Auftreten von Offsetfehlern führen. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs zeigt Figur 5 unterschiedliche vertikale Messpositionen des Sensors 143 mit Bezug auf die Bildsensorebene 140 und deren Auswirkung auf das Bereitstellen von Messwerten des Wellenfrontfehlers Z4. Sofern sich der Sensor 143 bzw. dessen Erfassungsbereich, wie in der mittleren Darstellung von Figur 5 angedeutet ist, an dessen Soll-Messposition 145 befindet, führt dies zu keiner Abweichung bei der Messung des Wellenfrontfehlers Z4. Eine falsche Positionierung mit Bezug auf die Höhe in Form einer vertikalen Abweichung dz , wie es in der linken und rechten Darstellung von Figur 5 gezeigt ist, hat jeweils ein Auftreten eines Offsetfehlers bei der Messung des Wellenfrontfehlers Z4 zur Folge.

Fehlpositionierungen dx , dy , dz des Sensors 143 äußern sich in den disjunkt gemessenen Wellenfrontfehlern durch Offsetfehler, d.h. scheinbare Bildfehler. Die Offsetfehler sind innerhalb der mit dem Sensor 143 erfassten Teilbereiche 151 des Bildfelds 150 konstant bzw. im Wesentlichen konstant, und bewirken auf diese Weise eine Versetzung der gemessenen Wellenfrontfehler, einschließlich der Mittelwerte der Wellenfrontfehler, in den entsprechenden Teilbereichen 151. Von Teilbereich 151 zu Teilbereich 151, und als nichtsystematische Messfehler auch von Messung zu Messung, kann eine Variation der Offsetfehler vorliegen. Die Offsetfehler können deutlich größer sein als andere Messfehler und insbesondere als die Feldvariation der tatsächlichen bzw. wahren Wellenfrontfehler. Dies kann insbesondere auf die Wellenfrontfehler bzw. Zernike-Koeffizienten niedriger Ordnung, insbesondere Z2, Z3 und Z4 zutreffen. Dies erschwert die Bestimmung von geeigne-

ten Justageprozessen und kann dazu führen, dass das System 100 am Ende nicht die Spezifikation erfüllt.

In Bezug auf das System 100, welches mit dem Sensor 141 mit mehreren nicht überlappenden Teilsensoren ausgestattet ist, kann es in vergleichbarer Weise in Betracht kommen, Messwerte eines oder mehrerer interessierender Abbildungsfehler, zum Beispiel der Wellenfrontfehler Z2, Z3 und/oder Z4, an Bildpunkten in disjunkten Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 bereitzustellen. Zu diesem Zweck wird mit Hilfe des Sensors 141 eine Messung durchgeführt, und werden Messsignale des Sensors 141 mit Hilfe der dazugehörigen Auswerteeinrichtung 160 zum Bereitstellen der Messwerte ausgewertet. Hierauf basierend kann eine weitere Justage bzw. Feinjustage der Abbildungsoptik 130 vorgenommen werden.

Es ist möglich, dass die Anordnung der Teilsensoren des Sensors 141 fehlerbehaftet ist, so dass die Teilsensoren Lagefehler, insbesondere mit Bezug auf die Freiheitsgrade x , y , z aufweisen. Derartige Lagefehler können, vergleichbar zu den oben beschriebenen Positionierungsfehlern des Sensors 143, zu einem Auftreten von in den Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 konstanten bzw. im Wesentlichen konstanten Offsetfehlern bei der Messung der Wellenfrontfehler Z2, Z3, Z4 (gegebenenfalls auch Übersprechen auf Bildfehler höherer Ordnung) führen. Für weitere Details hierzu wird auf die obige Beschreibung verwiesen.

Die Lagefehler der Bildsensoren des Sensors 141 können eine Folge von Einbaufehlern sein, aber auch während des Betriebs und/oder über die Lebensdauer durch Driften wie zum Beispiel temperaturinduzierte Größenänderungen von Bauteilen hervorgerufen werden. Daher können systematische, d.h. bei jeder Messung gleiche, als auch nichtsystematische, d.h. von Messung zu Messung unterschiedliche Messfehler vorliegen. Dies führt ebenfalls zu einer Beeinträchtigung der Justage der Abbildungsoptik 130.

Die bei dem reflektiv arbeitenden System 100 aufgezeigte Problematik kann auch bei einem in Transmission betriebenen Inspektionssystem, bei welchem ein transmittierter Strahlungsanteil erfasst wird, auftreten. Ein solches System 101, welches im Wesentlichen den gleichen Aufbau und die gleiche Funktionsweise wie das System 100 besitzt, ist schematisch in Figur 6 gezeigt. Es wird darauf hingewiesen, dass übereinstimmende Aspekte sowie gleiche und gleich wirkende Komponenten an dieser Stelle nicht erneut detailliert beschrieben werden, sondern dass stattdessen auf die obige Beschreibung Bezug genommen wird.

Das optische System 101 weist ebenfalls ein Beleuchtungssystem 110 zum Beleuchten eines in einer Objektebene 120 angeordneten Objekts 122 mit Strahlung 115 auf. Bei dem Objekt 122, welches teilweise durchstrahlt werden kann, kann es sich um ein Retikel handeln. Ein durch das Objekt 122 transmittierter Anteil der Strahlung 115 wird mit Hilfe einer Abbildungsoptik 130 in Richtung einer Bildebene 140 geführt. Über die Abbildungsoptik 130 kann ein Objektfeld der Objektebene 120 in ein Bildfeld 150 der Bildebene 140 abgebildet werden. Im Bereich der Bildebene 140 ist ein ortsauflösenden Sensor 141 mit mehreren Teilsensoren angeordnet, dessen Messsignale mit einer Auswerteeinrichtung 160 weiterverarbeitet bzw. ausgewertet werden können. Auf diese Weise erfolgt eine Strahlungserfassung in disjunkten Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 (vgl. Figur 3).

In Bezug auf das System 101 ist es ebenfalls von Interesse, Abbildungs- bzw. Wellenfrontfehler mit Hilfe einer Messung zu ermitteln, um hierauf basierend die Abbildungsoptik 130 justieren zu können. Hierzu kann im Rahmen eines Aufbaus des Systems 101 anstelle des Sensors 141 ein einzelner ortsauflösender Sensor 143 zum Einsatz kommen, welcher zur Strahlungserfassung an die Positionen der Teilsensoren des Sensors 141 bewegt wird. Fehlpositionierungen des Sensors 143 in den

Translationsfreiheitsgraden x , y , z können dazu führen, dass bereitgestellte Messwerte von interessierenden Wellenfrontfehlern, zum Beispiel Z_2 , Z_3 und/oder Z_4 , mit Offsetfehlern behaftet sind. Derartige Offsetfehler können individuell in Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 auftreten, und sich von Offsetfehlern anderer Teilbereiche 151 unterscheiden. Dies ist ebenso der Fall bei einer Messung mit Hilfe des Sensors 141 bei dem aufgebauten System 101, wobei die Offsetfehler hier durch Lagefehler der Teilsensoren des Sensors 141 verursacht werden können. Für weitere Details wird auf die obigen Ausführungen Bezug genommen. Dies betrifft auch den Aspekt, bei der Messung von Abbildungsfehlern ein Objekt bzw. Retikel 122 mit geeigneten Teststrukturen (nicht dargestellt) einzusetzen.

Im Folgenden werden mögliche Ausgestaltungen eines Verfahrens beschrieben, um fehlerbehaftete Messwerte eines interessierenden Abbildungsfehlers, welche wie vorstehend erläutert auf der Grundlage einer Messung mit dem Sensor 141 des Systems 100 bzw. 101 oder dem Sensor 143 an Bildpunkten in disjunkten Teilbereichen 151 eines Bildfelds 150 bereitgestellt werden können, zu korrigieren. Hierauf basierend kann eine zuverlässige Justage der dazugehörigen Abbildungsoptik 130 vorgenommen werden. Einzelne der erläuterten Schritte zur Unterdrückung der Messfehler können von der bzw. mit Hilfe der mit dem Sensor 141 bzw. 143 verbundenen Auswerteinrichtung 160 durchgeführt werden. Der Sensor 141 bzw. 143 und die dazugehörige Auswerteeinrichtung 160 können in diesem Sinne eine Vorrichtung zur Ermittlung eines korrigierten Abbildungsfehlers bilden.

In Bezug auf das mit dem Sensor 141 versehene System 100 bzw. 101 kann es sinnvoll sein, die Unterdrückung für jede Messung neu durchzuführen. Dies kann bei überwiegend nichtsystematischen Messfehlern in Betracht kommen. Bei überwiegend systematischen Messfehlern kann die Korrektur in Form einer dauerhaften Kalibrierung auf der Basis einer oder mehrerer Messun-

gen, zum Beispiel einmalig oder turnusmäßig, vorgesehen werden.

5 Zur Unterdrückung der in den Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 auftretenden Offsetfehler wird ausgenutzt, dass ein tatsächlicher, d.h. nicht mit Messfehlern behafteter Abbildungsfehler bezogen auf das gesamte Bildfeld 150 Regelmäßigkeiten bzw. vorhersagbare Eigenschaften aufweisen kann, und sich durch eine glatte Funktion über das Bildfeld 150 beschreiben
10 lässt. Auf die in den Teilbereichen 151 des Bildfelds individuell auftretenden Offsetfehler trifft dies nicht bzw. im Wesentlichen nicht zu. Um diese Gegebenheiten zu berücksichtigen, erfolgt die Korrektur unter Anwendung einer Approximation, in welcher bereitgestellte Messwerte des interessierenden
15 Abbildungsfehlers mit einer glatten Funktion und mit den Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 zugeordneten Teilbereichsfunktionen angenähert werden.

Mit Hilfe der glatten Funktion ist ein Verlauf des Abbildungsfehlers über das Bildfeld 150 wiedergebbbar. Die verwendete glatte Funktion bzw. deren Basisfunktionen können auf der Kenntnis der Funktionsweise der Abbildungsoptik 130 festgelegt werden. Die Teilbereichsfunktionen sind derart gewählt, dass im Rahmen der Approximation der betrachtete
25 Abbildungsfehler jeweils um den gleichen Wert in den einzelnen Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 verändert werden kann. Auf diese Weise kann der Effekt einer fehlerhaften Messung bzw. das individuelle Auftreten der den tatsächlichen Abbildungsfehler verfälschenden Offsetfehler in den Teilbereichen
30 151 des Bildfelds 150 nachgebildet werden. Dadurch kann eine genaue Annäherung an die Messwerte mit einer minimalen Abweichung erzielt werden, was wiederum eine zuverlässige Zurücksetzung bzw. Unterdrückung der Messfehler ermöglicht.

35 Bevor mögliche Ausgestaltungen des Korrekturablaufs im Detail beschrieben werden, werden zunächst die folgenden Randbedingungen und Definitionen festgelegt.

Das Objekt- bzw. Bildfeld 150 wird beschrieben auf N diskreten Feldpunkten (x_i, y_i) . Hierbei sind x_i und y_i die entsprechenden Ortskoordinaten der Bildpunkte, und es gilt $i = 1, 2, \dots, N$.

Die Koordinaten x_i und y_i sämtlicher Bildpunkte des Bildfelds 150 werden vorzugsweise so gewählt, dass der Mittelwert aller Koordinaten x_i und der Mittelwert aller Koordinaten y_i jeweils Null ist. Eine Solche Festlegung des Koordinatenursprungs erweist sich als numerisch günstig.

Das Bildfeld 150 umfasst n Teilbereiche 151, welche im Folgenden auch mit F_l bezeichnet werden. Hierbei gilt $l = 1, 2, \dots, n$. Des Weiteren gehören n_l der N Bildpunkte (x_i, y_i) zum Teilbereich F_l . Außerdem gilt

$$\sum_{l=1}^n n_l = N, \quad (1)$$

d.h. jeder Bildpunkt gehört zu genau einem Teilfeld F_l .

Für Größen, die von den Bildpunkten abhängen, wird folgende Notation eingeführt:

$$f_i = f(x_i, y_i), \text{ für } i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

f_i ist somit der Wert einer ortsabhängigen Funktion. Ferner wird folgende Definition verwendet:

$$\bar{f} := \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{pmatrix} \quad (3)$$

Ein Beispiel hierfür ist die Sammlung aller Ortskoordinaten der Bildpunkte gemäß:

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}, \quad \bar{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} \quad (4)$$

Des Weiteren werden folgende Terme bzw. Vektoren eingeführt,
 5 d.h. der Mittelwert gemäß

$$\langle f \rangle := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \quad (5)$$

und die Norm

10

$$\|\bar{f}\| := \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2} = \bar{f} \cdot \bar{f} \quad (6)$$

mit dem kanonischen Skalarprodukt „ · “.

15 Die komponentenweise Multiplikation „ \otimes “ von Vektoren \bar{f} , \bar{g} wird wie folgt definiert:

$$\bar{f} \otimes \bar{g} := \begin{pmatrix} f_1 \cdot g_1 \\ f_2 \cdot g_2 \\ \vdots \\ f_N \cdot g_N \end{pmatrix} \quad (7)$$

20 In Formel (7) bezeichnet „ · “ jeweils die gewöhnliche Multiplikation von Zahlen.

Die komponentenweise Potenz wird wie folgt definiert:

25

$$\bar{f}^{(v)} := \begin{pmatrix} f_1^v \\ f_2^v \\ \vdots \\ f_N^v \end{pmatrix} \quad (8)$$

Hieraus folgt zum Beispiel

$$\bar{f}^{(0)} := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \bar{f}^{(1)} = \bar{f}, \quad \bar{f}^{(2)} = \bar{f} \otimes \bar{f}, \quad \bar{f}^{(v+1)} = \bar{f}^{(v)} \otimes \bar{f}, \quad \text{usw.} \quad (9)$$

- 5 Für die in der Approximation verwendete glatte Funktion kann, aufgrund der Abhängigkeit des interessierenden Abbildungsfehlers von zwei Ortskoordinaten, eine zweidimensionale Polynomfunktion der Ordnungen w_x und w_y in x bzw. y vorgegeben werden. Die dazugehörigen Basisfunktionen bzw. -vektoren mit den
10 Ordnungen μ und ν in x bzw. y lassen sich wie folgt definieren:

$$\bar{p}_{\mu,\nu} = \bar{x}^{(\mu)} \otimes \bar{y}^{(\nu)} = \begin{pmatrix} x_1^\mu \cdot y_1^\nu \\ x_2^\mu \cdot y_2^\nu \\ \vdots \\ x_N^\mu \cdot y_N^\nu \end{pmatrix} \quad (10)$$

- 15 Hierbei gilt $\mu = 0, 1, 2, \dots, w_x$, und $\nu = 0, 1, 2, \dots, w_y$.

- Die in der Approximation verwendeten charakteristischen Teilbereichsfunktionen bzw. deren entsprechende Vektoren, mit deren Hilfe der Abbildungsfehler in den einzelnen Teilbereichen
20 F_1 des Bildfelds 150 jeweils um den gleichen Wert veränderbar ist, können, mit der Identitätsmatrix I , wie folgt festgelegt werden:

$$\bar{t}_l(x_i, y_i) := I_{F_l}(x_i, y_i), \quad \text{mit} \quad \bar{t}_l = \begin{pmatrix} t_{l1} \\ t_{l2} \\ \vdots \\ t_{lN} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad t_{li} = \begin{cases} 1, & (x_i, y_i) \in F_l \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (11)$$

- 25 Hierbei sind $i = 1, 2, \dots, N$ und $l = 1, 2, \dots, n$.

Dies bedeutet anschaulich, dass die Einträge einer Teilbereichsfunktion \bar{t}_l , die zu Bildpunkten gehört, die in dem da-

zugehörigen Teilbereich F_1 liegen, gleich eins sind. Die Einträge von \tilde{t}_i zu den Bildpunkten anderer Teilbereiche sind hingegen Null.

- 5 Ein tatsächlicher Abbildungsfehler, zum Beispiel der Z2-, Z3- oder Z4-Koeffizient einer Wellenfrontaberration, welcher im Folgenden mit

$$\bar{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a(x_1, y_1) \\ a(x_2, y_2) \\ \vdots \\ a(x_N, y_N) \end{pmatrix} \quad (12)$$

10

bezeichnet wird, kann in der Messung durch Messfehler verfälscht werden. Hierunter fallen die oben erwähnten zu bereinigenden (falschen) Offsets in den Teilfeldern F_1 des Bildfelds 150, welche den tatsächlichen Abbildungsfehler \bar{a} um

15 einen Term

$$\bar{b} = \sum_{i=1}^n \tilde{\alpha}_i \tilde{t}_i \quad (13)$$

verfälschen. Der gemeinsame Mittelwert der Offsetfehler

20

$$\langle b \rangle = \sum_{i=1}^n \frac{\tilde{\alpha}_i n_i}{N} \quad (14)$$

ändert nichts an der Form des Verlaufs des Abbildungsfehlers über das Bildfeld 150 und kann nicht aus der Forderung eines

25 glatten Verlaufs über das Feld 150 bestimmt werden. Eine durch die Offsetfehler verursachte Variation von Teilbereich zu Teilbereich F_1 des Bildfelds 150 lässt sich hieraus jedoch bestimmen und dadurch korrigieren.

- 30 Zu diesem Zweck wird der Funktionensatz aus glatter Funktion und Teilbereichsfunktionen an die gemessenen Abbildungsfehler bzw. die entsprechenden Messwerte, im Folgenden mit dem Vek-

tor \bar{a}' gekennzeichnet, angenähert. Hierfür kommt die folgende Vorgehensweise in Betracht, in welcher zunächst Matrizen, d.h. eine Matrix der Teilbereichsfunktionen

$$T := (\bar{t}_1 \quad \bar{t}_2 \quad \cdots \quad \bar{t}_n) \quad (15)$$

und eine Matrix der Basisfunktionen der glatten Funktion

$$P := (\bar{p}_{0,0} \quad \bar{p}_{0,1} \quad \cdots \quad \bar{p}_{0,w_y} \quad \bar{p}_{1,0} \quad \bar{p}_{1,1} \quad \cdots \quad \bar{p}_{w_x,w_y}) \quad (16)$$

definiert werden. Die vorgenannten Matrizen werden in der Funktionenmatrix

$$M = (T \quad P) \quad (17)$$

zusammengefasst.

Für die verwendeten Funktionen wird eine solche Annäherung an die Messwerte \bar{a}' des interessierenden Abbildungsfehlers angestrebt, dass nur noch eine minimale Abweichung verbleibt. Dies kann gemäß dem Annäherungs- bzw. Fitproblem

$$\|M \cdot \bar{c} - \bar{a}'\|^2 = \text{minimal} \quad (18)$$

umschrieben werden, wobei

$$\bar{c} = \begin{pmatrix} \bar{\alpha} \\ \bar{\beta} \end{pmatrix} \quad (19)$$

ein zu der Funktionenmatrix M gehörender Koeffizientenvektor ist. Hierbei umfasst der Vektor

$$\bar{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix} \quad (20)$$

die den Teilbereichsfunktionen zugehörigen Koeffizienten, und der Vektor

$$\bar{\beta} = \begin{pmatrix} \beta_{0,0} \\ \beta_{0,1} \\ \vdots \\ \beta_{w_x, w_y} \end{pmatrix} \quad (21)$$

5

umfasst die den Basisfunktionen der glatten Funktion zugehörigen Koeffizienten. Über die Koeffizienten können Gewichtungen der einzelnen Funktionen festgelegt bzw. wiedergegeben werden.

10

Eine Lösung des unter Formel (18) angegebenen Fitproblems, eine Annäherung an die Messwerte durch die glatte Funktion und die Teilbereichsfunktionen mit einer minimalen Abweichung zu erzielen, wird durch die folgende, mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 160 durchführbare Vorgehensweise ermöglicht. Hierbei wird nach dem Bilden der Funktionenmatrix M die Pseudoinverse M^- der Funktionenmatrix M gebildet und mit dem Vektor \bar{a}' aus Messwerten des Abbildungsfehlers gemäß

15

20

$$\bar{c} = M^- \cdot \bar{a}' \quad (22)$$

multipliziert, um den Koeffizientenvektor \bar{c} zu erhalten.

25

In dem Vektor \bar{c} sind die Gewichtungskoeffizienten $\bar{\alpha}$ der Teilbereichsfunktionen enthalten. Diese sind verknüpft mit den bei der Messung auftretenden Offsetfehlern, und können daher, wie im Folgenden beschrieben, zur Fehlerunterdrückung verwendet werden.

30

Die mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 160 durchführbare Fehlerkorrektur kann sich darauf beziehen, korrigierte Werte des Abbildungsfehlers, im Folgenden mit dem Vektor \bar{a}_{korr} gekennzeichnet, bereitzustellen. Hierbei können die Messwerte \bar{a}' des Abbildungsfehlers durch die korrigierten Werte \bar{a}_{korr} er-

setzt werden. Die korrigierten Werte \vec{a}_{korr} , welche dem tatsächlichen Abbildungsfehler \vec{a} im Wesentlichen entsprechen können, können bei der Justage der Abbildungsoptik 130 verwendet werden.

5 Zum Bereitstellen der korrigierten Werte \vec{a}_{korr} wird der Vektor \vec{c} gemäß Formel (22) gebildet, um hieraus entsprechend Formel (19) den Koeffizientenvektor $\vec{\alpha}$ zu erhalten, und wird die Matrix T der Teilbereichsfunktionen mit dem dazugehörigen
 10 Koeffizientenvektor $\vec{\alpha}$ zur Bildung eines Produkts multipliziert. Bei dem Produkt handelt es sich um die Einträge bzw. Gewichtungen sämtlicher angenäherter Teilbereichsfunktionen. Zur Bildung der korrigierten Werte \vec{a}_{korr} wird das Produkt, bis auf dessen Mittelwert, von dem Vektor \vec{a}' der Messwerte wie
 15 folgt subtrahiert:

$$\vec{a}_{korr} = \vec{a}' - (T \cdot \vec{\alpha} - \langle T \cdot \vec{\alpha} \rangle) \quad (23)$$

Hierbei kann der Mittelwert des Produkts von dem Produkt abgezogen werden, und dieser Term kann von dem Vektor \vec{a}' subtrahiert werden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass vorwiegend die aufgrund der Offsetfehler hervorgerufenen relativen, also von Teilbereich zu Teilbereich des Bildfelds
 150 vorliegenden Versetzungen bzw. Unterschiede in den Messwerten \vec{a}' korrigiert werden, und im Wesentlichen keine globale bzw. einheitliche Größenkorrektur über sämtliche Teilbereiche erfolgt. Dadurch kann erzielt werden, dass die korrigierten Werte \vec{a}_{korr} dem tatsächlichen Abbildungsfehler \vec{a} , abgesehen von einem kleinen Unterschied in Form eines konstanten bzw. globalen Offsetwerts und einem Punktrauschen, nahe
 30 kommen können. Infolgedessen ist eine zuverlässige Rekonstruktion der aufgrund der Offsetfehler verschobenen Mittelwerte des gemessenen Abbildungsfehlers in den Teilbereichen F_1 möglich.

35 Die vorstehend beschriebene Vorgehensweise hat gegenüber der einfacheren Lösung, die auf den ersten Blick nicht messbaren,

weil in den Offsetfehlern verschwindenden Mittelwerte des interessierenden Abbildungsfehlers in den Teilbereichen F_1 des Bildfelds 150 zu eliminieren, indem von den Messwerten \bar{a}' in jedem der Teilbereiche F_1 jeweils der dazugehörige Mittelwert subtrahiert wird, oder die Mittelwerte des Abbildungsfehlers bei einer Justagerechnung nicht zu berücksichtigen, den Vorzug, dass auch diese Größen bei der Justage der Abbildungsoptik 130 berücksichtigt werden können. Die Anwendung der einfacheren Lösung kann jedoch für den Fall in Betracht kommen, dass die Regelmäßigkeit des Feldverlaufs des Abbildungsfehlers durch andere Messfehlerbeiträge in einem solchen Ausmaß gestört ist, dass eine sinnvolle Korrektur und dadurch Rekonstruktion der Mittelwerte des Abbildungsfehlers in den Teilbereichen F_1 nicht möglich ist. Hierdurch kann verhindert werden, dass die Justage der Abbildungsoptik 130 auf der Grundlage von Messfehlern bzw. Messrauschen durchgeführt wird.

Zur weiteren Veranschaulichung des auf die Approximation mit glatter Funktion und Teilbereichsfunktionen gestützten Verfahrens zur Korrektur von fehlerbehafteten bzw. verrauschten Messwerten sind in Figur 7 beispielhaft Ergebnisse einer Simulation in Bezug auf einen Wellenfrontfehler Z2 gezeigt. Dies bezieht sich auf Werte des Wellenfrontfehlers Z2 an Bildpunkten in vier Teilbereichen 151 eines Bildfelds 150, wobei die Teilbereiche 151 entsprechend Figur 3 angeordnet sein können.

Anhand von relativ kleinen Punkten sind an Bildpunkten des Bildfelds 150 vorliegende simulierte tatsächliche Werte Z_s des Wellenfrontfehlers Z2 in den Teilbereichen 151 veranschaulicht (wahrer Zustand). Die Werte Z_s wurden basierend auf Starrkörperverkipnungen bzw. Bewegungen von Objektivspiegeln einer Abbildungsoptik 130 simuliert.

Mit kreisförmigen Punkten sind simulierte gemessene Werte Z_m des Wellenfrontfehlers Z2 an den entsprechenden Bildpunkten

angedeutet. Hierbei handelt es sich um die Summe aus tatsächlichen Werten Z_s und mit der Messung einhergehenden Offsetfehlern, welche in jedem der Teilbereiche 151 im Wesentlichen gleich, und von Teilbereich 151 zu Teilbereich 151 hinsichtlich des Vorzeichens und/oder des Betrags unterschiedlich sind. Aufgrund der Offsetfehler ist die Differenz zwischen den Werten Z_s und Z_m in jedem der Teilbereiche 151 annähernd konstant. Der funktionale Verlauf des Wellenfrontfehlers Z_2 (beispielsweise die Krümmung) auf jedem der Teilbereiche 151 ist daher für Z_s und Z_m fast gleich.

Figur 7 zeigt darüber hinaus anhand von größeren ausgefüllten Punkten unter Anwendung des oben erläuterten Korrekturablaufs gebildete rekonstruierte Werte Z_r des Wellenfrontfehlers Z_2 an den Bildpunkten in den Teilbereichen 151. Bei der hier benutzten glatten Funktion handelte es sich um ein Polynom dritter Ordnung in x und fünfter Ordnung in y . Es ist zu erkennen, dass in jedem der Teilbereiche 151 die gleiche Versetzung zwischen den korrigierten Werten Z_r und den tatsächlichen Werten Z_s des Wellenfrontfehlers Z_2 vorliegt. Hierbei handelt es sich um den oben erwähnten kleinen globalen Offset zwischen den Werten Z_r und Z_s . Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass das Korrekturverfahren eine zuverlässige Unterdrückung von Offsetfehlern ermöglicht, welche Folge der Messung in disjunkten Teilfeldern 151 des Bildfelds 150 sind.

Für das oben erläuterte und gemäß Formel (18) auf einer Annäherung mit glatter Funktion und Teilbereichsfunktionen basierende Korrekturverfahren können unterschiedliche und ggf. eine Verbesserung ermöglichende Abwandlungen in Betracht kommen. Auf derartige Ausgestaltungen des Korrekturablaufs, welche ebenfalls mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 160 durchführbar sind, und welche in gleicher Weise als Grundlage zur Justage der Abbildungsoptik 130 dienen können, wird im Folgenden näher eingegangen. Übereinstimmende Merkmale und Aspekte werden im Folgenden nicht erneut detailliert beschrieben. Für Details hierzu wird stattdessen auf die vorstehende

Beschreibung Bezug genommen. Des Weiteren wird auf die Möglichkeit hingewiesen, mehrere der im Folgenden erläuterten Varianten gemeinsam anzuwenden und/oder Merkmale von zwei oder mehreren der beschriebenen Ausgestaltungen miteinander zu kombinieren.

In einer möglichen Variante werden anstelle der oben gemäß Formel (11) definierten Teilbereichsfunktionen \bar{t}_i mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen \tilde{t}_i verwendet, welche bezogen auf das Bildfeld 150 den Mittelwert Null besitzen. Derartige Teilbereichsfunktionen können gebildet werden, indem von jeder der mittelwertbehafteten Teilbereichsfunktion \bar{t}_i jeweils der dazugehörige Mittelwert subtrahiert wird:

$$\tilde{t}_i := \bar{t}_i - \langle \bar{t}_i \rangle \quad (24)$$

Das Durchführen der oben beschriebenen Schritte, d.h. Bildung der Funktionenmatrix M , Bildung der Pseudoinversen M^+ , Bildung des Koeffizientenvektors \bar{c} , Bildung der korrigierten Werte \bar{a}_{korr} des betrachteten Abbildungsfehlers, mit mittelwertfreien Teilbereichsfunktionen bietet mehrere Vorteile. Hierunter fällt zum Beispiel, dass die oben erläuterte Subtraktion des Mittelwerts des Produkts (Gewichtungen sämtlicher angenäherter Teilbereichsfunktionen) bei der Bildung der korrigierten Werte \bar{a}_{korr} des Abbildungsfehlers entfallen kann. Aufgrund der mittelwertfreien Teilbereichsfunktionen kann diese Subtraktion implizit enthalten sein, so dass der Mittelwert des Produkts den Wert Null aufweisen kann. Die korrigierten Werte können daher, abweichend von Formel (23), wie folgt gebildet werden:

$$\bar{a}_{korr} = \bar{a}' - T \cdot \bar{\alpha}, \quad \text{mit } T = \begin{pmatrix} \tilde{t}_1 & \tilde{t}_2 & \dots & \tilde{t}_n \end{pmatrix} \quad (25)$$

Des Weiteren kann die Approximation eindeutig sein. Denn bei mittelwertbehafteten Teilbereichsfunktionen kann der Mittelwert der Einträge der Teilbereichsfunktionen doppelt in der Menge der verwendeten Funktionen enthalten sein, und zwar als

Konstante in der glatten Funktion und als Summe der Teilbereichsfunktionen gemäß:

$$\sum_{l=1}^n \tilde{t}_l = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

5

Dadurch kann die Approximation uneindeutig sein.

Eine weitere numerische Verbesserung lässt sich durch folgende Regularisierung erzielen. Hierbei wird das Verfahren bzw.
 10 werden oben angegebene Schritte nicht mit den einfachen Polynom-Basisfunktionen gemäß Formel (10), sondern stattdessen mit orthogonalisierten oder orthonormierten Basisfunktionen durchgeführt. In einer weiteren Variante kommen normierte Polynom-Basisfunktionen zum Einsatz. Dies vereinfacht eine
 15 sinnvolle Regularisierung mit Singulärwert-Schwelle, die beispielsweise bei der Berechnung der Pseudoinversen M^- angewandt werden kann.

Des Weiteren ist eine Vereinfachung des mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 160 durchführbaren Ablaufs dergestalt möglich,
 20 dass die Approximation und Korrektur in gemeinsamer Weise durchgeführt werden. Hierfür werden mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen \tilde{t}_i gemäß Formel (24) verwendet, und wird die bereitgestellte Pseudoinverse M^- der Funktionenmatrix M in
 25 zwei Teilmatrizen zerlegt, wobei über eine Teilmatrix M_T^- die Koeffizienten $\bar{\alpha}$ der Teilbereichsfunktionen, und über die andere Teilmatrix M_P^- die übrigen Koeffizienten $\bar{\beta}$ erzeugbar sind:

30

$$M^- = \begin{pmatrix} M_T^- \\ M_P^- \end{pmatrix} \quad (27)$$

Unter Verwendung der mittelwertfreien Teilbereichsfunktionen \tilde{t}_i und der Teilmatrix M_T^- lässt sich der gemäß Formel (25)

beschriebene Zusammenhang zwischen den korrigierten und den gemessenen Werten des Abbildungsfehlers wie folgt ausdrücken:

$$\bar{a}_{\text{kor}} = \bar{a}' - T \cdot \bar{\alpha} = \bar{a}' - T \cdot M_T^- \cdot \bar{a}' = (I - T \cdot M_T^-) \cdot \bar{a}' = S \cdot \bar{a}', \quad (28)$$

5

$$\text{mit } T = \begin{pmatrix} \tilde{t}_1 & \tilde{t}_2 & \dots & \tilde{t}_n \end{pmatrix} \quad (29)$$

Hierbei ist I die Identitätsmatrix. Die Matrix S , gebildet durch Subtraktion des Produkts aus der Matrix T der mittelfreien Teilbereichsfunktionen \tilde{t}_i und der Teilmatrix M_T^- von der Identitätsmatrix I , d.h.

10

$$S := I - T \cdot M_T^-, \quad (30)$$

15 wird im Folgenden als Korrekturmatrix bezeichnet.

Durch Bereitstellen bzw. Bilden der Korrekturmatrix S gemäß Formel (30) ist es möglich, den Ablauf der Korrektur der Offsetfehler zur Bildung von korrigierten Werten des interessierenden Abbildungsfehlers mit Hilfe einer einfachen Multiplikation der Messwerte mit der Matrix S durchzuführen:

20

$$\bar{a}_{\text{kor}} = S \cdot \bar{a}' \quad (31)$$

25 Das Bilden der Matrix S und die Multiplikation führen ebenfalls zu einer Lösung des unter Formel (18) angegebenen Fitproblems, eine Annäherung an die Messwerte durch die glatte Funktion und die Teilbereichsfunktionen mit einer minimalen Abweichung zu erzielen.

30

In diesem Zusammenhang wird ferner auf die Möglichkeit hingewiesen, die einmal gebildete Korrekturmatrix S jeweils zur Korrektur von Messwerten des Abbildungsfehlers heranzuziehen, welche mit Hilfe verschiedener Messungen gewonnen werden.

35

Eine weitere Variante der mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 160 durchführbaren Fehlerkorrektur besteht darin, zusätzlich

oder alternativ zu korrigierten fehlerbereinigten Werten des betrachteten Abbildungsfehlers einen approximierten Verlauf des Abbildungsfehlers zu bilden. Der approximierte Verlauf kann dem tatsächlichen, d.h. ohne Messfehler behafteten Abbildungsfehler im Wesentlichen entsprechen. Es ist auch hier möglich, fehlerbehaftete Messwerte des Abbildungsfehlers durch den approximierten Verlauf zu ersetzen, und basierend auf dem approximierten Verlauf eine Justage der Abbildungsoptik 130 vorzunehmen.

Durch die Bildung des approximierten Verlaufs des Abbildungsfehlers kann Punktrauschen eliminiert werden. Es ist jedoch möglich, dass in dem approximierten Verlauf lokale Bildfehler, im Gegensatz zu den korrigierten Werten des Abbildungsfehlers, nicht mehr enthalten, und dadurch gegebenenfalls nicht mehr erkennbar sind. Dieser Nachteil kann umgangen werden, indem neben dem approximierten Verlauf auch korrigierte Werte des Abbildungsfehlers gebildet bzw. bei der Justage berücksichtigt werden.

Die Bildung des approximierten Verlaufs kann ebenfalls im Rahmen einer gemeinsam durchgeführten Approximation und Korrektur erfolgen. Hierzu kann vergleichbar zu der oben beschriebenen Vereinfachung vorgegangen werden, wobei mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen \tilde{t}_i gemäß Formel (24) verwendet werden und die Pseudoinverse M^- der Funktionenmatrix M entsprechend Formel (27) zerlegt wird. Der approximierte Verlauf, bei welchem es sich um die angenäherte und einen rekonstruierten bzw. fehlerbereinigten Gesamtmittelwert aufweisende glatte Funktion handelt, und welcher im Folgenden mit \bar{a}_{fit} gekennzeichnet wird, hängt mit der Matrix P der Basisfunktionen der glatten Funktion, der Teilmatrix M_P^- und den Messwerten \bar{a}' des Abbildungsfehlers wie folgt zusammen:

$$\bar{a}_{fit} = P \cdot M_P^- \cdot \bar{a}' = R \cdot \bar{a}' \quad (32)$$

Die Matrix R , gebildet durch Multiplikation der Matrix P der Basisfunktionen der glatten Funktion mit der Teilmatrix M_p^- gemäß

$$R := P \cdot M_p^-, \quad (33)$$

5

wird im Folgenden als Verlaufserzeugungsmatrix bezeichnet.

Durch Bereitstellen der Verlaufserzeugungsmatrix R gemäß Formel (33) ist es möglich, die Bildung des approximierten Verlaufs des Abbildungsfehlers mit Hilfe einer einfachen Multiplikation der Messwerte mit der Matrix R durchzuführen:

10

$$\bar{a}_{fit} = R \cdot \bar{a}' \quad (34)$$

15

Das Bilden der Matrix R und die Multiplikation führen ebenfalls zu einer Lösung des unter Formel (18) angegebenen Fitproblems, eine Annäherung an die Messwerte durch die glatte Funktion und die Teilbereichsfunktionen mit einer minimalen Abweichung zu erzielen.

20

In diesem Zusammenhang wird ferner auf die Möglichkeit hingewiesen, die einmal gebildete Matrix R jeweils heranzuziehen, um approximierte Verläufe des Abbildungsfehlers aus Messwerten zu bilden, welche mit Hilfe verschiedener Messungen gewonnen werden.

25

Eine weitere Variante des mit Hilfe der Auswerteeinrichtung durchführbaren Ablaufs umfasst eine Interpolation und/oder Extrapolation, indem wenigstens ein Ergänzungswert des betrachteten Abbildungsfehlers gebildet wird. Ein solcher Ergänzungswert gehört zu einem Bildpunkt, für welchen kein Messwert des Abbildungsfehlers vorliegt. Das Bilden des wenigstens einen Ergänzungswerts, welcher ebenfalls im Rahmen einer Justage der Abbildungsoptik berücksichtigt werden kann, wird auf der Grundlage des approximierten Verlaufs durchgeführt.

35

Im Hinblick auf das oben beschriebene Verfahren und dessen unterschiedliche Ausgestaltungen wird auf die Möglichkeit hingewiesen, von mehreren Abbildungsfehlern, zum Beispiel den Wellenfrontfehlern Z2, Z3 und Z4, jeweils dazugehörige Messwerte an Bildpunkten in disjunkten Teilbereichen 151 eines Bildfelds 150 bereitzustellen und eine eigene separate Fehlerkorrektur durchzuführen. Hierbei ist es möglich, für jeden der betrachteten Abbildungsfehler korrigierte Werte, einen approximierten Verlauf und/oder wenigstens einen Ergänzungswert bereitzustellen, und hierauf basierend die Justage der Abbildungsoptik 130 durchzuführen.

Im Hinblick auf mehrere Abbildungsfehler kann es auch zu einem Übersprechen kommen. Hierbei können Fehlerursachen für Offsetfehler eines ersten gemessenen Abbildungsfehlers sich auch auf wenigstens einen zweiten gemessenen Abbildungsfehler auswirken, so dass dieser mit entsprechenden Offsetfehlern behaftet sein kann. Es ist zum Beispiel möglich, dass vertikale Fehlpositionierungen eines Sensors, durch welche Offsetfehler bei der Messung des Wellenfrontfehlers Z4 hervorgerufen werden (vgl. Figur 4), auch zu einem Auftreten von Offsetfehlern bei der Messung des Wellenfrontfehlers Z2 und/oder Z3 führen. Ein solches Übersprechen auf den zweiten Abbildungsfehler (zum Beispiel Z2 bzw. Z3) lässt sich unterdrücken, indem auf der Grundlage einer Fehlerkorrektur des ersten Abbildungsfehlers (zum Beispiel Z4), welche in der oben beschriebenen Art und Weise unter Verwendung einer Approximation erfolgt, eine zusätzliche Korrektur des zweiten Abbildungsfehlers durchgeführt wird. Die zusätzliche Korrektur kann zum Beispiel basierend auf Koeffizienten $\bar{\alpha}$ der Teilbereichsfunktionen erfolgen, welche im Rahmen der Fehlerkorrektur des ersten Abbildungsfehlers bestimmt werden. Vor oder nach der zusätzlichen Korrektur kann eine Fehlerkorrektur des zweiten Abbildungsfehlers gemäß den obigen Ansätzen unter Verwendung einer Approximation durchgeführt werden.

In Bezug auf das System 100 bzw. 101 der Figuren 1, 6 kann darüber hinaus ein weiteres Korrekturverfahren zur Anwendung kommen, auf welches im Folgenden näher eingegangen wird.

Hierbei werden fehlerbehaftete Messwerte von mehreren Abbildungs- bzw. Wellenfrontfehlern, welche von der Abbildungsop-
5 tik 130 verursacht werden können, in gemeinsamer Weise korrigiert. Es können zu einem großen Teil dieselben bzw. vergleichbare Merkmale zur Anwendung kommen, wie sie oben mit Bezug auf die Korrektur eines einzelnen gemessenen Wellen-
10 frontfehlers beschrieben wurden. Hinsichtlich übereinstimmender Details und Aspekte wird daher auf die obige Beschreibung Bezug genommen.

Bei dem Verfahren werden Messwerte der interessierenden Wellenfrontfehler, zum Beispiel der Wellenfrontfehler Z2, Z3 und
15 Z4, auf der Grundlage einer Strahlungsmessung an Bildpunkten in mehreren disjunkten Teilbereichen 151 des Bildfelds 150 bereitgestellt. Dies erfolgt mit Hilfe des mehrere Teilsensoren aufweisenden Sensors 141 oder mit Hilfe des an unterschiedlichen Messpositionen angeordneten Sensors 143. Die
20 Messsignale des Sensors 141 oder 143 werden mit Hilfe der dazugehörigen Auswerteeinrichtung 160 ausgewertet, wodurch die Messwerte der mehreren interessierenden Wellenfrontfehler bereitgestellt werden können. Aufgrund von fehlerhaften Sensor-
25 positionierungen, welche bei dem Sensor 141 Lagefehler der Teilsensoren sind, können die Messwerte entsprechende Messfehler aufweisen. Bei dem Verfahren können fehlerhafte Positionierungen bezogen auf Translationsfreiheitsgrade und Rotationsfreiheitsgrade, also dx-, dy-, dz-Translationen und Ver-
30 kippungen bzw. Rotationen bezüglich der x-, y-, z-Achsen, berücksichtigt werden.

Das Verfahren wird unter Anwendung einer Approximation durchgeführt, in welcher Messwerte der interessierenden Wellen-
35 frontfehler mit mehreren, den Wellenfrontfehlern zugeordneten glatten Funktionen und mit den Teilbereichen des Bildfelds zugeordneten Teilbereichsfunktionen gemeinsam approximiert

werden. Die glatten Funktionen, welche mehrere Basisfunktionen umfassen und bei welchen es sich um Polynomfunktionen handeln kann, sind derart festgelegt, dass hiermit Verläufe der dazugehörigen Wellenfrontfehler über das Bildfeld 150
5 wiedergebar sind. Die glatten Funktionen bzw. deren Basisfunktionen können auf der Kenntnis der Funktionsweise der Abbildungsoptik 130 festgelegt werden.

Die Teilbereichsfunktionen sind derart gewählt, dass hiermit
10 der Einfluss von fehlerhaften Positionierungen des Sensors 141 oder 143 auf die Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler wiedergebar sind. Dadurch können tatsächliche Auswirkungen von fehlerhaften Positionierungen auf die Messung der Wellenfrontfehler nachgebildet bzw. modelliert werden. Derartige
15 Wirkungen lassen sich zum Beispiel mit Hilfe einer Messung oder einer Simulation, beispielsweise durch Strahlpropagation, bestimmen. Hierauf basierend werden die Teilbereichsfunktionen festgelegt.

20 Mit Hilfe derartiger Teilbereichsfunktionen lassen sich im Rahmen der Approximation kompliziertere Veränderungen in den Teilbereichen 151 bewirken als lediglich eine Größenveränderung um den gleichen Wert, wie es der Fall bei den oben beschriebenen Teilbereichsfunktionen ist. Es ist zum Beispiel
25 möglich, dass eine dz-Translation des verwendeten Sensors außer zu einer Veränderung des Wellenfrontfehlers Z4 auch zu einem linearen Anstieg des Wellenfrontfehlers Z2 über einen Teilbereich 151 des Bildfelds 150 führt. In diesem Fall kann eine Teilbereichsfunktion zur Anwendung kommen, welche eine
30 Gerade beschreibt, deren Steigung abhängig ist von der Sensitivität bzw. Wirkung der dz-Verschiebung des Sensors. Die dz-Verschiebung des Sensors kann sich auch auf andere Wellenfrontfehler auswirken. Möglich ist zum Beispiel eine kubische Variation des Wellenfrontfehlers Z3. In diesem Fall kann als
35 Teilbereichsfunktion ein Polynom dritter Ordnung mit festgelegten Koeffizienten verwendet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die vorgenannten Angaben lediglich der beispiel-

haften Erläuterung dienen, und dass andere bzw. komplexere Zusammenhänge vorliegen können.

Im Rahmen des Verfahrens zur gemeinsamen Korrektur mehrerer Wellenfrontfehler können vergleichbare Schritte durchgeführt werden, wie sie oben mit Bezug auf die Korrektur eines einzelnen Wellenfrontfehlers beschrieben wurden. Derartige Schritte zur Unterdrückung der Messfehler, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird, können auch hier mit Hilfe der mit dem Sensor 141 bzw. 143 verbundenen Auswerteinrichtung 160 durchgeführt werden. Der Sensor 141 bzw. 143 und die dazugehörige Auswerteeinrichtung 160 können in diesem Sinne eine Vorrichtung zur Ermittlung von mehreren korrigierten Wellenfrontfehlern bilden. Des Weiteren kann die Justage der Abbildungsoptik 130 basierend auf den korrigierten Wellenfrontfehlern erfolgen.

Bei den im Folgenden beschriebenen Schritten zur Fehlerkorrektur werden dieselben Bezeichnungen für Vektoren und Matrizen benutzt, und wird zum Teil auf dieselben Formeln Bezug genommen, wie sie oben angegeben sind. Es wird darauf hingewiesen, dass sich derartige Komponenten hierbei, abweichend von den obigen Ausführungen, auf die mehreren Wellenfrontfehler, die dazugehörigen mehreren glatten Funktionen, und die fehlerhafte Positionierungen wiedergebenden Teilbereichsfunktionen beziehen. In diesem Zusammenhang kann für in den Vektoren und Matrizen enthaltene Elemente eine geeignete Anordnung bzw. Gruppierung vorgesehen sein.

Zur Fehlerkorrektur können korrigierte Werte \bar{a}_{korr} der mehreren Wellenfrontfehler gebildet werden, mit welchen Messwerte \bar{a}' der Wellenfrontfehler ersetzt werden. Dies kann wie folgt durchgeführt werden.

Hierzu werden eine Funktionenmatrix M aus einer Matrix T aus Teilbereichsfunktionen und einer Matrix P aus Basisfunktionen der glatten Funktionen, sowie die Pseudoinverse M^{-} der Funk-

tionenmatrix M gebildet. Ferner wird ein zu der Funktionenmatrix M gehörender Koeffizientenvektor \vec{c} durch Multiplikation der Matrix M mit dem Vektor \vec{a}' der Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler gemäß Formel (22) gebildet. Dies stellt
5 eine Lösung des unter Formel (18) angegebenen Fitproblems dar. Der Koeffizientenvektor \vec{c} umfasst den Teilbereichsfunktionen zugehörige Koeffizienten $\vec{\alpha}$ und den Basisfunktionen zugehörige Koeffizienten $\vec{\beta}$.

10 Des Weiteren wird die Matrix T der Teilbereichsfunktionen mit dem entsprechenden Koeffizientenvektor $\vec{\alpha}$ zur Bildung eines Produkts multipliziert, und wird das Produkt bis auf dessen Mittelwert von dem Vektor \vec{a}' der Messwerte gemäß Formel (23) subtrahiert, um die korrigierten Werte \vec{a}_{kor} der mehreren Wellenfrontfehler zu bilden. Diese Vorgehensweise macht es mög-
15 lich, vorwiegend relative, also von Teilbereich zu Teilbereich des Bildfelds 150 vorliegende Unterschiede in den Messwerten zu korrigieren und eine einheitliche bzw. globale Korrektur über sämtliche Teilbereiche zu vermeiden.

20 Für die gemeinsame Korrektur der mehreren Wellenfrontfehler stehen in analoger Weise dieselben Varianten und Abwandlungen zur Verfügung, wie sie oben erläutert wurden.

25 In einer möglichen Variante des Korrekturablaufs werden mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen verwendet, welche bezogen auf das Bildfeld 150 den Mittelwert Null besitzen. Zur Bildung solcher Funktionen kann von jeder der mittelwertbehafteten Teilbereichsfunktionen jeweils der dazugehörige Mittelwert subtrahiert werden. Dadurch ergibt sich eine eindeutige
30 Approximation, und ist es möglich, dass die oben beschriebene Subtraktion des Mittelwerts des Produkts implizit enthalten ist und dadurch entfallen kann.

35 Das Verfahren kann mit einfachen Polynom-Basisfunktionen, oder auch mit orthogonalisierten oder orthonormierten Basis-

funktionen der glatten Funktionen durchgeführt werden. Ferner können normierte Polynom-Basisfunktionen zum Einsatz kommen.

In einer weiteren, unter Verwendung mittelwertfreier Teilbereichsfunktionen durchgeführten Variante wird aus der bereitgestellten Pseudoinversen M^- der Matrix M eine Teilmatrix M_T^- gebildet, über welche Koeffizienten \bar{a} der Teilbereichsfunktionen erzeugbar sind. Des Weiteren wird eine Korrekturmatrix S gebildet, indem das Produkt aus der Matrix T der mittelwertfreien Teilbereichsfunktionen und der Teilmatrix M_T^- von der Identitätsmatrix I gemäß Formel (30) subtrahiert wird. Das Bilden der korrigierten Werte \bar{a}_{kor} der mehreren Wellenfrontfehler wird durch Multiplikation der Matrix S mit den Messwerten \bar{a}' gemäß Formel (31) durchgeführt. Diese Vorgehensweise führt ebenfalls zur Lösung des Fitproblems gemäß Formel (18).

In einer weiteren Variante erfolgt zusätzlich oder alternativ zur Bildung von korrigierten Werten eine Bildung von approximierten Verläufen \bar{a}_{fit} der mehreren Wellenfrontfehler. Dies ermöglicht eine Eliminierung von Punktrauschen. Es ist möglich, Messwerte der Wellenfrontfehler durch die approximierten Verläufe zu ersetzen.

In einem hierzu geeigneten, erneut unter Verwendung mittelwertfreier Teilbereichsfunktionen durchgeführten Ablauf wird aus der bereitgestellten Pseudoinversen M^- der Matrix M eine Teilmatrix M_P^- gebildet, über welche Koeffizienten $\bar{\beta}$ der Basisfunktionen P der glatten Funktionen erzeugbar sind. Des Weiteren wird eine Verlaufserzeugungsmatrix R gebildet, indem die Matrix P der Basisfunktionen der glatten Funktionen mit der Teilmatrix M_P^- gemäß Formel (33) multipliziert wird. Das Bilden der approximierten Verläufe \bar{a}_{fit} der mehreren Wellenfrontfehler wird durch Multiplikation der Matrix R mit den Messwerten \bar{a}' gemäß Formel (34) durchgeführt. Diese Vorgehensweise führt ebenfalls zur Lösung des Fitproblems von Formel (18).

Eine weitere Variante umfasst eine Interpolation und/oder Extrapolation, indem wenigstens ein Ergänzungswert von wenigstens einem der mehreren Wellenfrontfehler gebildet wird, wobei der Ergänzungswert zu Ortskoordinaten gehört, für welche kein Messwert des Wellenfrontfehlers vorliegt. Diese Ausgestaltung kann auf der Grundlage eines approximierten Verlaufs des betreffenden Wellenfrontfehlers erfolgen.

- 10 Mit Bezug auf das Verfahren zur Ermittlung eines einzelnen korrigierten Wellenfrontfehlers und das Verfahren zur gemeinsamen Ermittlung mehrerer korrigierter Wellenfrontfehler ist die Möglichkeit gegeben, dass sich die Messung auf wenigstens einen weiteren Teilbereich 152 des Bildfelds 150 bezieht, welcher mit wenigstens einem der separaten, nicht überlappenden Teilbereiche 151 überlappt (vgl. zum Beispiel Figur 9, auf welche weiter noch unten näher eingegangen wird).

In diesem Zusammenhang kann zum Beispiel eine Bildung eines vereinigten Teilbereichs mit gemeinsamen Messwerten in Betracht kommen, welcher den weiteren Teilbereich 152 und den wenigstens einen hiermit überlappenden Teilbereich 151 umfasst. Gemeinsame Messwerte des bzw. der Wellenfrontfehler können auf der Grundlage einer geeigneten Vorverarbeitung bzw. Korrektur von zunächst in den einzelnen überlappenden Teilbereichen 151, 152 gewonnenen Messwerten bereitgestellt werden. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe eines Stitching-Verfahrens erfolgen. Der vereinigte Teilbereich und die dazugehörigen Messwerte können anschließend, entsprechend der anderen und hiervon disjunkten Teilbereiche, bei der Korrektur und Approximation zur Anwendung kommen. Bei dieser Vorgehensweise wird dem vereinigten Teilbereich eine entsprechende Teilbereichsfunktion zugeordnet.

- 35 In entsprechender Weise können auch mehrere vereinigte Teilbereiche gebildet, hierfür gemeinsame Messwerte bereitgestellt, und diese bei der Korrektur und Approximation verwen-

det werden. Dieser Fall kann in Betracht kommen, wenn mehrere weitere Teilbereiche 152 vorliegen, welche mit anderen Teilbereichen 151 überlappen (vgl. Figur 9). Hierbei ist es ferner möglich, dass lediglich vereinigte, und voneinander disjunkte Teilbereiche gebildet werden.

Sofern Messwerte des bzw. der Wellenfrontfehler in wenigstens einem weiteren Teilbereich 152 des Bildfelds 150 gewonnen werden, wobei der weitere Teilbereich 152 mit wenigstens einem der separaten und nicht überlappenden Teilbereiche 151 überlappt, kann ferner folgender Ablauf in Betracht kommen. Hierbei wird die Approximation mit einer weiteren, dem weiteren Teilbereich 152 zugeordneten Teilbereichsfunktion durchgeführt. Je nach Ausgestaltung des Verfahrens kann die weitere Teilbereichsfunktion derart gewählt sein, dass hiermit im Rahmen der Approximation in dem betreffenden Teilbereich 152 eine Veränderung des betrachteten Wellenfrontfehlers jeweils um den gleichen Wert hervorruft, oder fehlerhafte Sensor-Positionierungen wiedergebar sind.

Es erfolgt somit keine Vereinigung von Teilbereichen. Stattdessen wird der weitere überlappende Teilbereich 152 wie die übrigen Teilbereiche 151 behandelt. Daher kann in einem Überlappungsbereich von überlappenden Teilbereichen 151, 152 eine zweifache, oder bei mehr als zwei überlappenden Teilbereichen eine mehrfache Approximation stattfinden. Bei mehreren weiteren Teilbereichen 152 können in entsprechender Weise mehrere weitere Teilbereichsfunktionen eingesetzt werden.

Ergänzend wird im Folgenden anhand der Figuren 8 bis 10 erläutert, mit welchen Ausgestaltungen bzw. Anordnungen von zur Messung vorgesehenen Teilbereichen 151, 152 eines Bildfelds 150 die vorstehend beschriebenen Verfahren zur Anwendung kommen können. Die Teilbereiche 151, 152 können unterschiedliche geometrische Formen aufweisen, so dass abweichend von den Figuren 3, 4 auch andere als rechteckige Formen wie zum Beispiel dreieckige, sechseckige oder auch runde bzw. kreisfö-

mige Konturen vorliegen können, wie es in den Figuren 8 bis 10 beispielhaft gezeigt ist.

Derartige Formen richten sich nach der Ausgestaltung eines
5 zur Messung eingesetzten Sensors bzw. nach dessen Erfassungsbereich. Sofern lediglich ein Sensor, zum Beispiel der an unterschiedliche Messpositionen bewegte Sensor 143, zum Einsatz kommt, können sämtliche Teilbereiche 151, 152, abweichend von den Figuren 8 bis 10, dieselben Konturen besitzen.

10 Figur 8 veranschaulicht eine Messung, in welcher sämtliche Teilbereiche 151 des Bildfelds 150 disjunkt sind. Hiervon abweichend kann sich eine Messung und damit das Bereitstellen von Messwerten zusätzlich auf wenigstens einen weiteren Teilbereich 152 des Bildfelds 150 beziehen, welcher mit wenigstens einem der separaten, nicht überlappenden Teilbereiche 151 überlappt. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe des an unterschiedlichen Messpositionen angeordneten Sensors 143 verwirklicht werden.

20 In diesem Zusammenhang veranschaulicht Figur 9 eine beispielhafte Messung mit sechs paarweise überlappenden Teilbereichen 151, 152. Hierbei sind die mit durchgezogenen Linien dargestellten Teilbereiche 151 zueinander disjunkt, und sind die gestrichelt angedeuteten weiteren Teilbereiche 152 zueinander disjunkt. Bei einer solchen Messung können die oben erläuterten Vorgehensweisen in Betracht kommen. Es ist zum Beispiel möglich, aus den sechs paarweise überlappenden Teilbereichen 151, 152 drei zusammengesetzte bzw. vereinigte Teilbereiche
25 zu bilden, für jeden der vereinigten Teilbereiche mit Hilfe einer Vorverarbeitung gemeinsame Messwerte bereitstellen, und diese der Korrektur und Approximation zugrunde zu legen. Hierbei werden den vereinigten Teilbereichen zugeordnete Teilbereichsfunktionen eingesetzt.

35 Des Weiteren ist es in Bezug auf Figur 9 möglich, keine Vereinigung vorzunehmen, sondern stattdessen die Approximation

mit den einzelnen Teilbereichen 151, 152 zugeordneten Teilbereichsfunktionen durchzuführen. Da vorliegend jeweils zwei Teilbereiche 151, 152 überlappend sind, findet in jedem Überlappungsbereich eine zweifache Approximation statt.

5

Figur 10 veranschaulicht eine weitere beispielhafte Messung mit überlappenden Teilbereichen 151, 152. Diese decken zusammen einen zusammenhängenden Bereich des Bildfelds 150 ab.

Auch hierbei sind die Teilbereiche 151 zueinander disjunkt, und sind die gestrichelt angedeuteten weiteren Teilbereiche 152 zueinander disjunkt. Bei einer solchen Gegebenheit kommt ebenfalls der Verfahrensablauf, die Approximation mit den einzelnen Teilbereichen 151, 152 zugeordneten Teilbereichsfunktionen durchzuführen, in Betracht.

15

Die oben erläuterten Ausführungsformen stellen bevorzugte bzw. beispielhafte Ausführungsformen der Erfindung dar. Darüber hinaus sind weitere Ausführungsformen vorstellbar, welche weitere Abwandlungen und/oder Kombinationen von Merkmalen umfassen können.

20

Es ist zum Beispiel möglich, mit Hilfe der oben beschriebenen Ansätze fehlerbehaftete Messwerte einer anderen interessierenden einzelnen Größe, welche von wenigstens einem Parameter abhängig ist, zu korrigieren. Der dazugehörige Parameterbereich kann ein Bildfeld darstellen oder nicht. In entsprechender Weise wird eine Messung durchgeführt, um hierauf basierend Messwerte der Größe in mehreren Teilbereichen des Parameterbereichs bereitzustellen. Eine Korrektur wird unter Verwendung einer Approximation durchgeführt, in welcher Messwerte der Größe mit einer den Verlauf der Größe in dem Parameterbereich wiedergebenden glatten Funktion und mit den Teilbereichen des Parameterbereichs zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden. Die Teilbereichsfunktionen sind derart gewählt, dass im Rahmen der Approximation eine individuelle Veränderung der Größe in den Teilbereichen des Parameterbereichs hervorgerufen ist. Die Korrektur kann

35

sich darauf beziehen, korrigierte Werte der Größe, einen approximierten Verlauf der Größe und/oder wenigstens einen Ergänzungswert der Größe zu bilden.

5 Ein mögliches Beispiel für eine andere Größe ist eine Verzeichnungsgröße, mit deren Hilfe eine in einem Bildfeld auftretende Verzeichnung wiedergegeben werden kann. Durch Durchführen des Verfahrens können fehlerbehaftete Messwerte der Verzeichnungsgröße, welche in mehreren bzw. disjunkten Teil-

10 bereichen des Bildfelds gewonnen werden können, korrigiert werden. Dies umfasst zum Beispiel ein Bilden von korrigierten Werten der Verzeichnungsgröße zum Ersatz von Messwerten. Möglich ist des Weiteren eine Rekonstruktion der Verzeichnung über das gesamte Bildfeld. Dies kann zum Beispiel durch eine

15 Bildung eines approximierten Verlaufs und/oder eine Bildung von Ergänzungswerten zur Interpolation und Extrapolation erfolgen.

Anstelle einer optischen Größe kann auch eine andere Größe in

20 Teilbereichen eines Parameterbereichs gemessen und gemäß den oben beschriebenen Ansätzen korrigiert werden. Hierunter fällt zum Beispiel eine gemessene Höhe bzw. ein gemessenes Höhenprofil eines Prüflings. Hierbei kann es in Betracht kommen, Messwerte der Höhe in disjunkten Teilbereichen eines

25 zweidimensionalen Bildfelds bereitzustellen, und Messfehler wie oben angegeben zu korrigieren. Die Messung kann zum Beispiel mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops oder mit Hilfe eines Oberflächeninterferometers durchgeführt werden.

30 In Abhängigkeit der jeweiligen messfehlerbehafteten und zu korrigierenden Größe kann der dazugehörige Parameterbereich zusätzlich oder alternativ auch einen oder mehrere andere Parameter als Ortskoordinaten aufweisen. Beispielsweise kann es sich bei dem mindestens einen Parameter, von welchem die Größe

35 abhängig ist, auch um eine Zeit handeln. Ein weiteres Beispiel ist ein Parameterbereich umfassend eine Zeit und wenigstens eine Ortskoordinate.

Eine weitere mögliche Abwandlung in Bezug auf das Verfahren zur Ermittlung einer einzelnen korrigierten Größe besteht darin, anstelle von Offsetfehlern andere, in Teilbereichen eines Parameterbereichs individuell auftretende Messfehler zu korrigieren. Zu diesem Zweck werden geeignete Teilbereichsfunktionen verwendet, mit deren Hilfe eine Verfälschung der gemessenen Größe durch derartige Messfehler in den Teilbereichen des Parameterbereichs nachgebildet werden kann.

Bezugszeichenliste

	100, 101	System
	110	Beleuchtungssystem
5	115	Strahlung
	120	Objektebene
	121, 122	Objekt, Retikel
	130	Abbildungsoptik
	140	Bildebene
10	141, 143	Sensor
	145	Soll-Messposition
	150	Bildfeld
	151, 152	Teilbereich
	160	Auswerteeinrichtung
15	165	Verzeichnung
	dx, dy, dz	Abweichung
	x, y, z	Ortskoordinate
	Z_2, Z_3, Z_4	Wellenfrontfehler
	Z_s	tatsächlicher Wellenfrontfehler
20	Z_m	gemessener Wellenfrontfehler
	Z_r	rekonstruierter Wellenfrontfehler

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Parameter (x, y) abhängigen Größe (Z2, Z3, Z4) in einem Parameterbereich (150) des mindestens einen Parameters (x, y), umfassend die Verfahrensschritte:

Durchführen einer Messung, wobei Messwerte der Größe (Z2, Z3, Z4) in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen (151) des Parameterbereichs (150) bereitgestellt werden; und

Durchführen einer Korrektur von Messwerten der Größe (Z2, Z3, Z4) unter Verwendung einer Approximation, in welcher Messwerte der Größe (Z2, Z3, Z4) mit einer glatten Funktion und mit den Teilbereichen (151) des Parameterbereichs (150) zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden,

wobei mit Hilfe der glatten Funktion ein Verlauf der Größe (Z2, Z3, Z4) über den Parameterbereich (150) wiedergebar ist,

und wobei mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen eine individuelle Veränderung der Größe (Z2, Z3, Z4) in den Teilbereichen (151) des Parameterbereichs (150) hervorgerufen ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der mindestens eine Parameter eine Ortskoordinate (x, y) ist.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Parameterbereich ein Bildfeld (150) darstellt.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen die Größe

(Z2, Z3, Z4) jeweils um den gleichen Wert in den dazugehörigen Teilbereichen (151) veränderbar ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
5 wobei die Korrektur eine Bildung von korrigierten Werten der Größe (Z2, Z3, Z4) umfasst.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
10 wobei die Approximation eine Bestimmung von Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen umfasst, und wobei Messwerte der Größe (Z2, Z3, Z4) unter Verwendung der Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen korrigiert werden.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
15 wobei die Approximation folgende Schritte umfasst:

Bildung einer Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktion;

20 Bildung der Pseudoinversen der Funktionenmatrix; und

Multiplikation der Pseudoinversen der Funktionenmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der Größe (Z2, Z3, Z4) zur Bildung eines Koeffizientenvektors, welcher Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen und Koeffizienten der Basisfunktionen der glatten Funktion umfasst.
25

8. Verfahren nach Anspruch 7,
30 wobei die Korrektur folgende Schritte umfasst:

Multiplikation einer Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit einem Vektor aus Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen zur Bildung eines Produkts; und

35 Subtraktion des Produkts bis auf dessen Mittelwert von dem Vektor aus Messwerten der Größe (Z2, Z3, Z4).

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mittelwertfreie Teilbereichsfunktionen verwendet werden.

5 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Approximation und Korrektur folgende Schritte umfasst:

10 Bildung einer Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktion;

Bildung der Pseudoinversen der Funktionenmatrix;

15 Bildung einer Teilmatrix aus der Pseudoinversen der Funktionenmatrix, über welche Koeffizienten der Teilbereichsfunktionen erzeugbar sind;

20 Multiplikation einer Matrix aus Teilbereichsfunktionen mit der Teilmatrix zum Bilden eines Produkts;

Subtraktion des Produkts von einer Identitätsmatrix zur Bildung einer Korrekturmatrix; und

25 Multiplikation der Korrekturmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der Größe (Z2, Z3, Z4).

30 11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Korrektur eine Bildung eines approximierten Verlaufs der Größe (Z2, Z3, Z4) umfasst.

35 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Korrektur eine Bildung von wenigstens einem Ergänzungswert der Größe (Z2, Z3, Z4) umfasst, wobei der Ergänzungswert der Größe zu einem Wert des mindestens einen Parameters gehört, für welchen kein Messwert der Größe (Z2, Z3, Z4) vorliegt.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei die Approximation und Korrektur folgende Schritte
umfasst:

5 Bildung einer Funktionenmatrix aus Teilbereichsfunktionen und Basisfunktionen der glatten Funktion;

 Bildung der Pseudoinversen der Funktionenmatrix;

10 Bildung einer Teilmatrix aus der Pseudoinversen der Funktionenmatrix, über welche Koeffizienten der Basisfunktionen der glatten Funktion erzeugbar sind;

15 Multiplikation einer Matrix aus Basisfunktionen der glatten Funktion mit der Teilmatrix zur Bildung einer Verlaufserzeugungsmatrix; und

 Multiplikation der Verlaufserzeugungsmatrix mit einem Vektor aus Messwerten der Größe (Z2, Z3, Z4).

20

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei Messwerte der Größe (Z2, Z3, Z4) in wenigstens einem weiteren Teilbereich (152) des Parameterbereichs (150) bereitgestellt werden, wobei der weitere Teilbereich (152) mit wenigstens einem der separaten und nicht überlappenden Teilbereiche (151) überlappt, und wobei
25 die Approximation mit einer weiteren, dem weiteren Teilbereich (152) zugeordneten Teilbereichsfunktion durchgeführt wird, mit deren Hilfe eine individuelle Veränderung der Größe (Z2, Z3, Z4) in dem weiteren Teilbereich (152) des Parameterbereichs (150) hervorrufbar ist.

30

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei die Größe eine Größe aus der folgenden Gruppe ist:
35 eine optische Größe;
 eine Verzeichnungsgröße;
 ein Wellenfrontfehler;

35

ein Koeffizient zu einem Zernike-Polynom einer Wellenfrontentwicklung.

16. Verfahren nach Anspruch 15,

5 wobei die Messung eine mit Hilfe eines ortsauflösenden Sensors (141, 143) durchgeführte Strahlungsmessung ist.

17. Verfahren nach Anspruch 16,

10 wobei der ortsauflösende Sensor (143) an unterschiedlichen Messpositionen angeordnet wird oder der ortsauflösende Sensor (141) mehrere Teilsensoren aufweist.

18. Verfahren zur Justage einer Abbildungsoptik (130) eines optischen Systems (100, 101),

15

wobei unter Verwendung eines ortsauflösenden Sensors (141, 143), welcher mit einer von der Abbildungsoptik (130) kommenden Strahlung (115) bestrahlbar ist, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 16 zur Ermittlung einer korrigierten optischen Größe (Z2, Z3, Z4) durchgeführt wird,

20

und wobei die Abbildungsoptik (130) auf der Grundlage der korrigierten optischen Größe (Z2, Z3, Z4) justiert wird.

25

19. Vorrichtung zur Ermittlung einer korrigierten und von mindestens einem Parameter (x, y) abhängigen Größe (Z2, Z3, Z4) in einem Parameterbereich (150) des mindestens einen Parameters (x, y), aufweisend:

30

eine Messeinrichtung (141, 143, 160), mit deren Hilfe Messwerte der Größe (Z2, Z3, Z4) in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen (151) des Parameterbereichs (150) bereitstellbar sind; und

35

eine Auswerteeinrichtung (160) zur Korrektur von Mess-

werten der Größe (Z2, Z3, Z4), wobei die Auswerteeinrichtung (160) ausgebildet ist, die Korrektur unter Verwendung einer Approximation durchzuführen, in welcher Messwerte der Größe (Z2, Z3, Z4) mit einer glatten Funktion und mit den Teilbereichen (151) zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden,

wobei mit Hilfe der glatten Funktion ein Verlauf der Größe (Z2, Z3, Z4) über den Parameterbereich (150) wiedergebar ist,

und wobei mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen eine individuelle Veränderung der Größe (Z2, Z3, Z4) in den Teilbereichen (151) des Parameterbereichs (150) hervorgerufen ist.

20. Verfahren zur Ermittlung von mehreren korrigierten und von zwei Ortskoordinaten (x, y) abhängigen Wellenfrontfehlern (Z2, Z3, Z4) in einem Bildfeld (150), umfassend die Verfahrensschritte:

Durchführen einer Strahlungsmessung mit Hilfe eines ortsauflösenden Sensors (141, 143), wobei Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler (Z2, Z3, Z4) in mehreren separaten und nicht überlappenden Teilbereichen (151) des Bildfelds (150) bereitgestellt werden; und

Durchführen einer gemeinsamen Korrektur von Messwerten der mehreren Wellenfrontfehler (Z2, Z3, Z4) unter Verwendung einer Approximation, in welcher Messwerte der Wellenfrontfehler (Z2, Z3, Z4) mit mehreren, den Wellenfrontfehlern (Z2, Z3, Z4) zugeordneten glatten Funktionen und mit den Teilbereichen (151) des Bildfelds (150) zugeordneten Teilbereichsfunktionen approximiert werden,

wobei mit Hilfe der glatten Funktionen Verläufe der mehreren Wellenfrontfehler (Z2, Z3, Z4) über das Bildfeld

(150) wiedergebbar sind,

und wobei mit Hilfe der Teilbereichsfunktionen der Einfluss von fehlerhaften Positionierungen des ortsauflösenden Sensors (141, 143) auf die Messwerte der mehreren Wellenfrontfehler (Z2, Z3, Z4) wiedergebbar ist.

21. Verfahren nach Anspruch 20,
wobei der ortsauflösende Sensor (143) an unterschiedlichen Messpositionen angeordnet wird oder der ortsauflösende Sensor (141) mehrere Teilsensoren aufweist.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 oder 21,
wobei die Korrektur wenigstens eines der Folgenden umfasst:

eine Bildung von korrigierten Werten der mehreren Wellenfrontfehler;

eine Bildung von approximierten Verläufen der mehreren Wellenfrontfehler;

eine Bildung von wenigstens einem Ergänzungswert von wenigstens einem der Wellenfrontfehler, wobei der Ergänzungswert zu Ortskoordinaten gehört, für welche kein Messwert des Wellenfrontfehlers vorliegt.

1/7

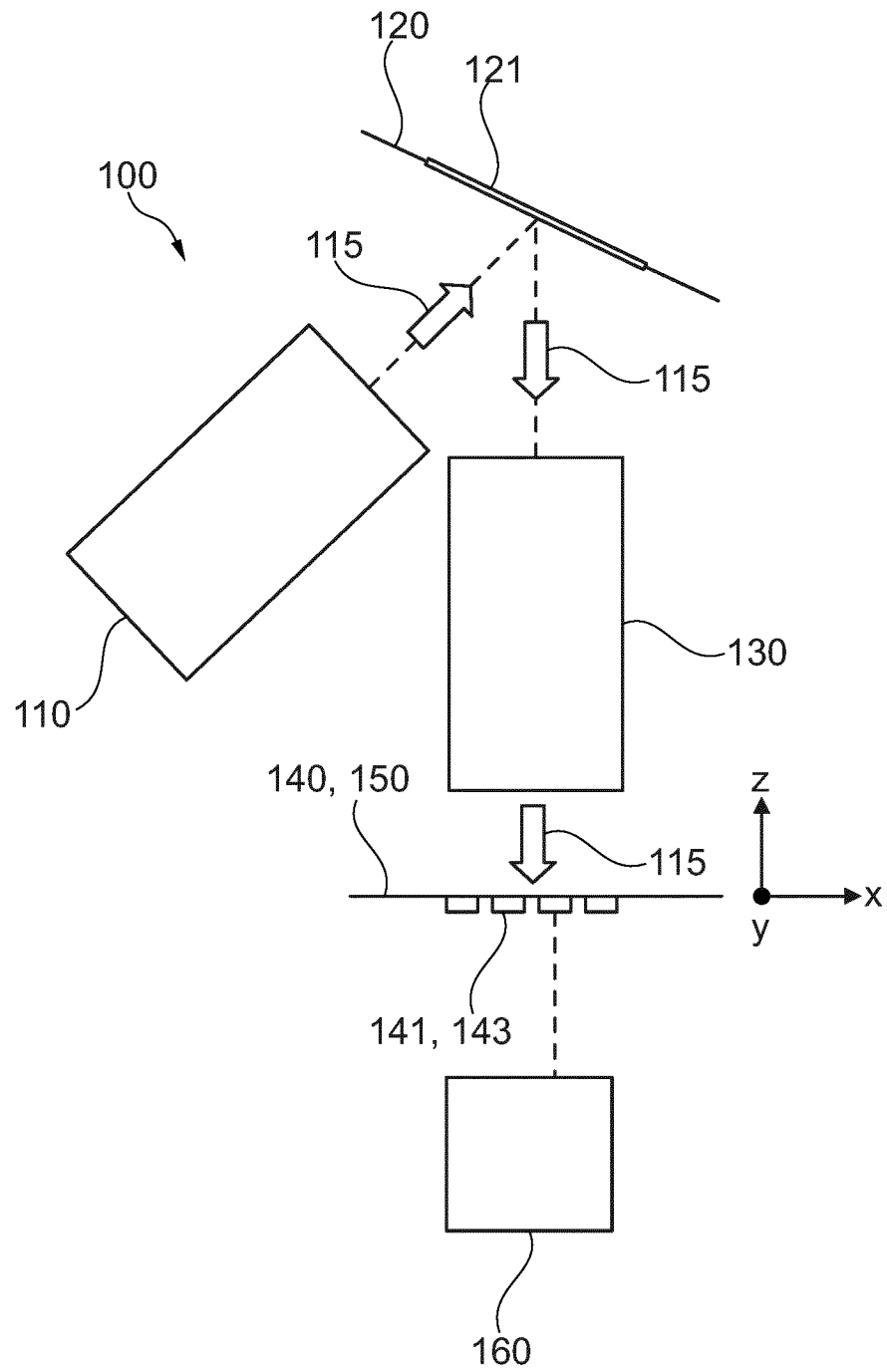


Fig. 1

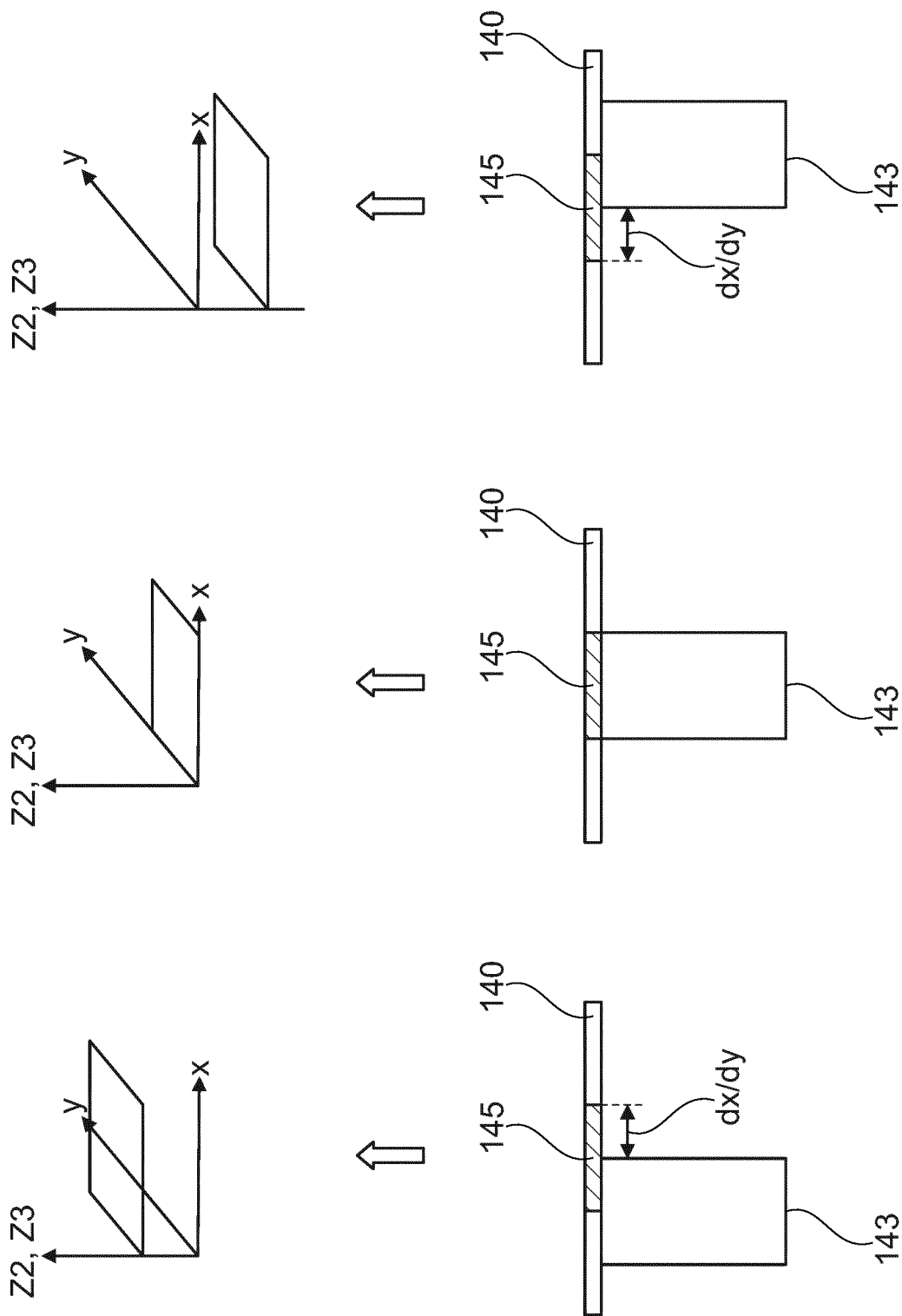


Fig. 2

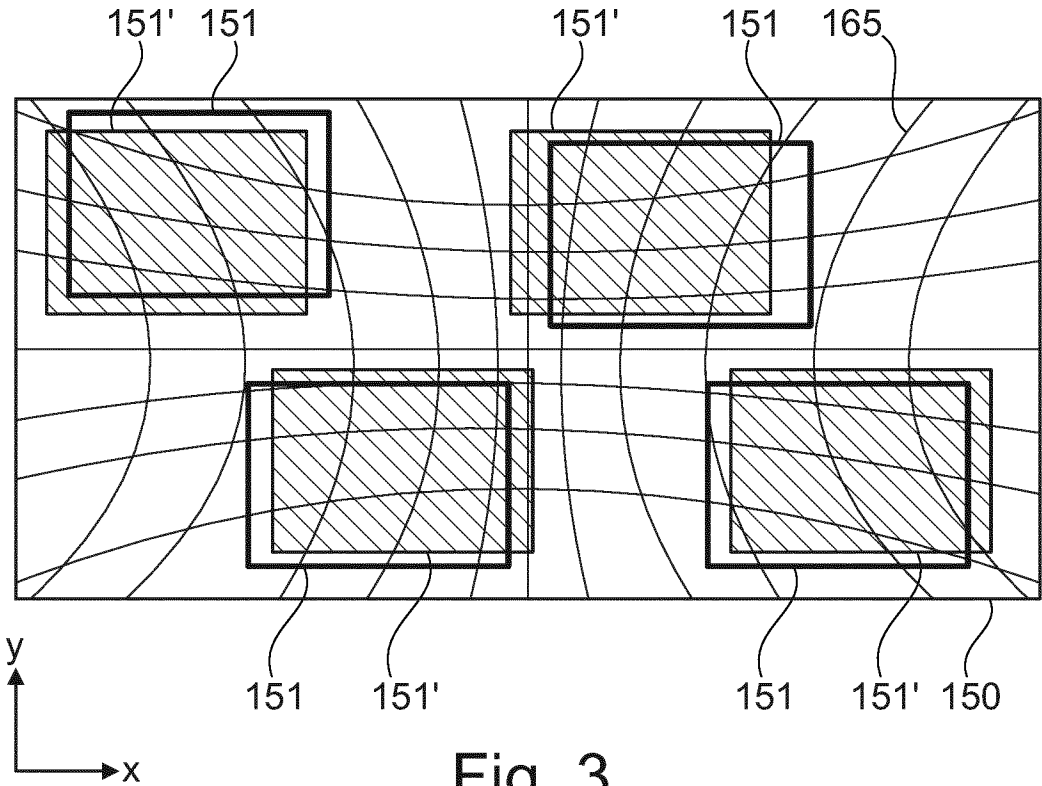


Fig. 3

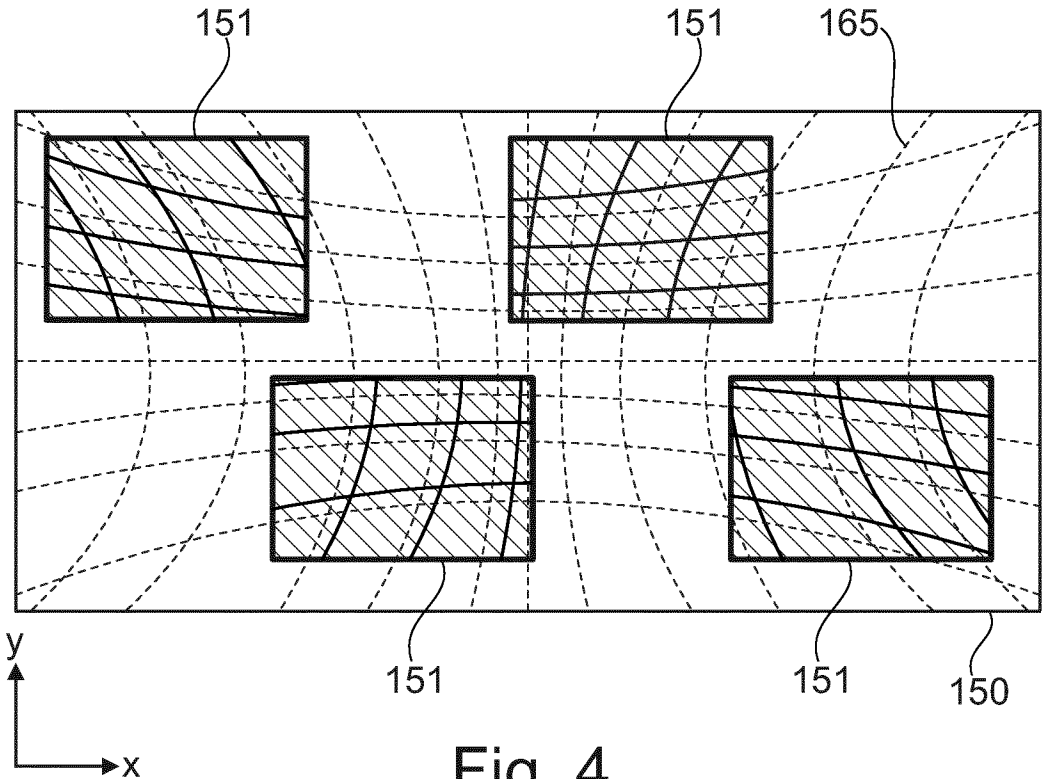
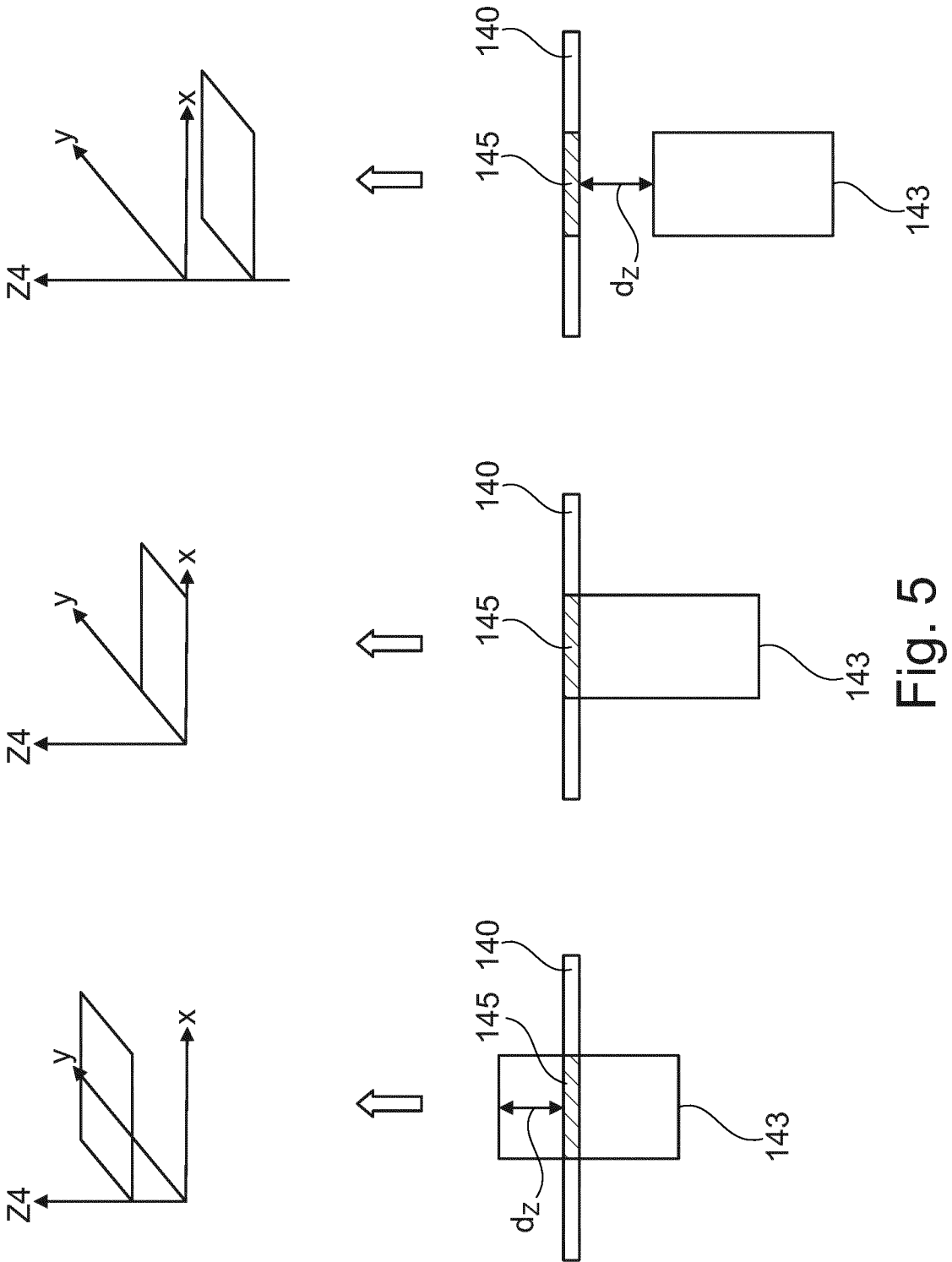


Fig. 4



5/7

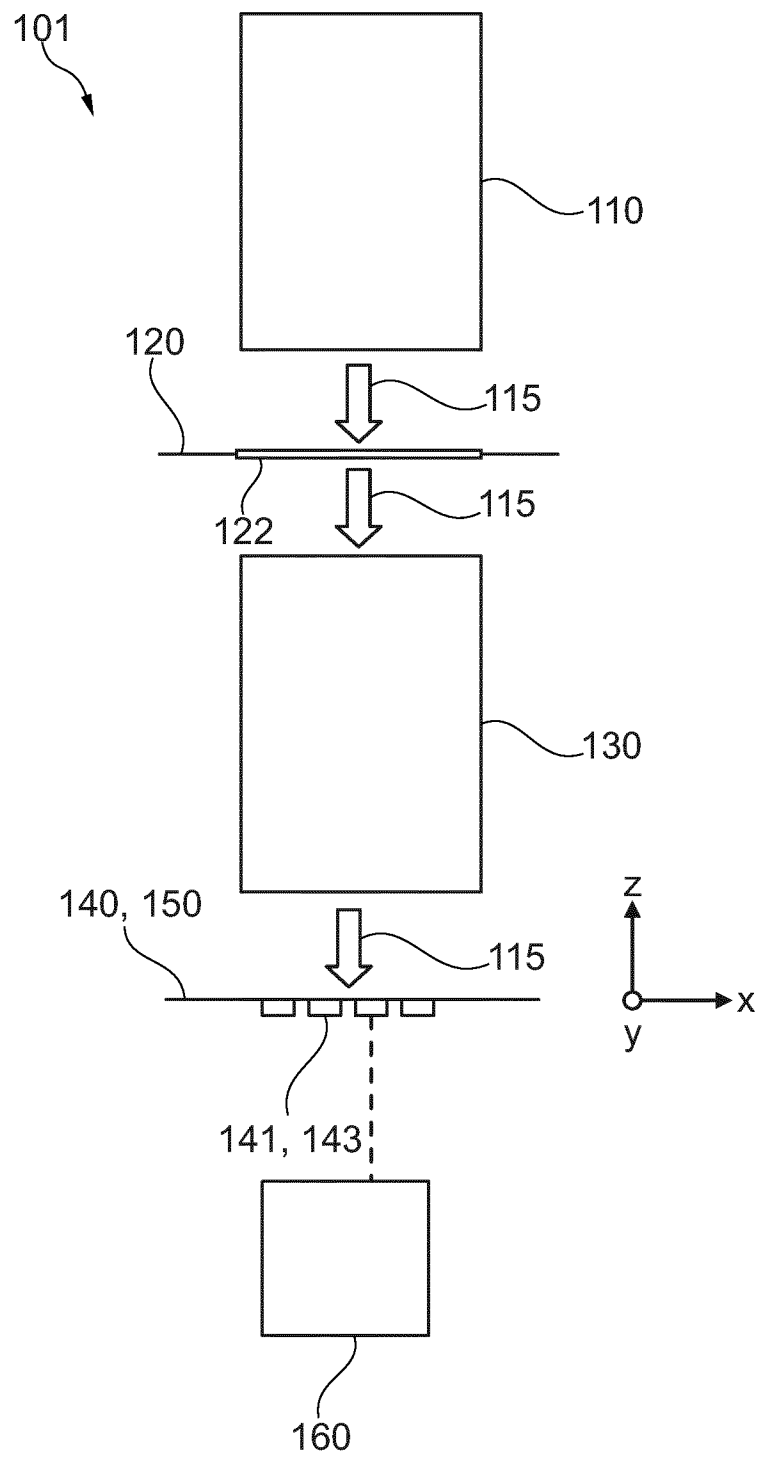


Fig. 6

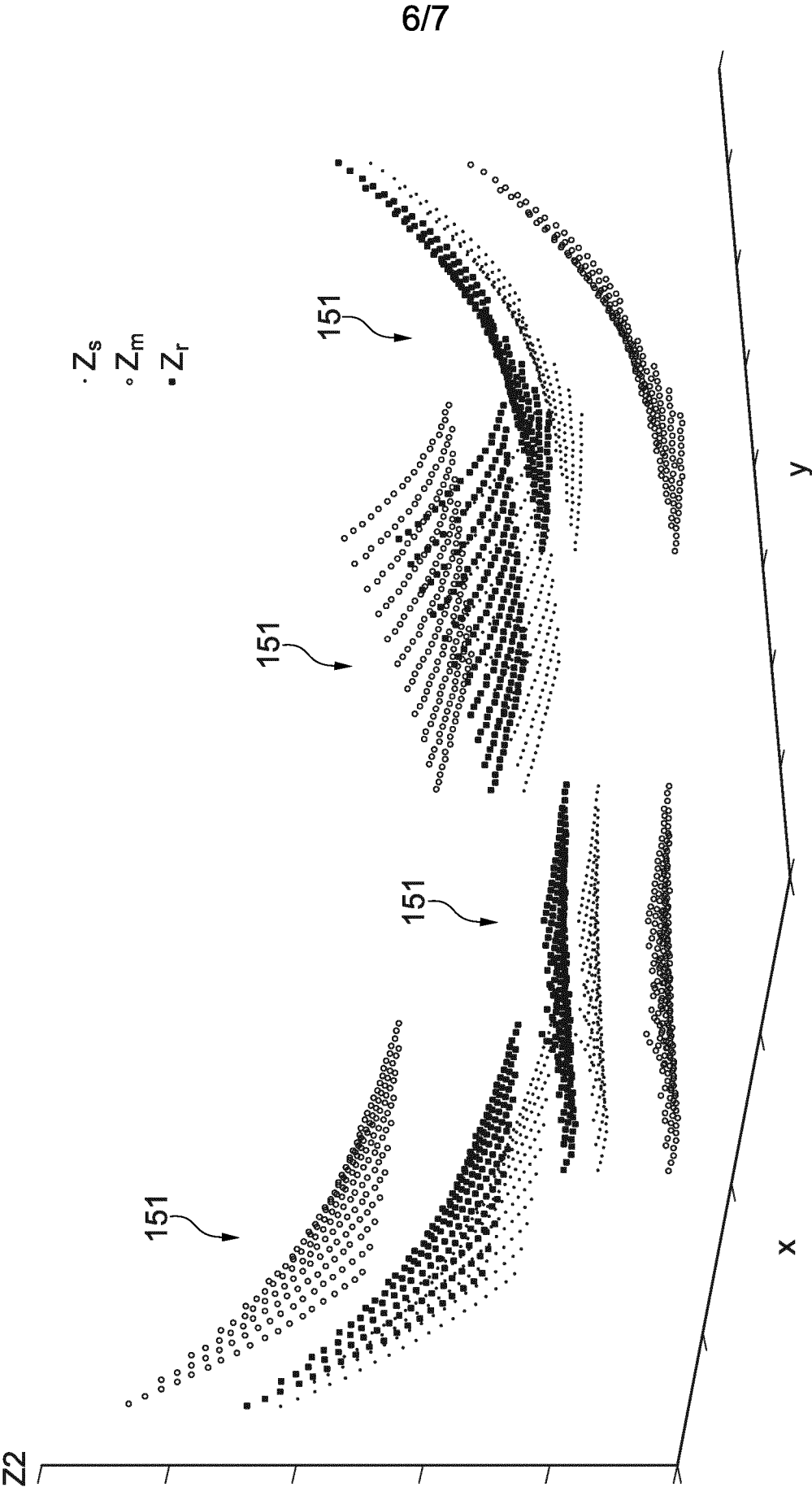


Fig. 7

7/7

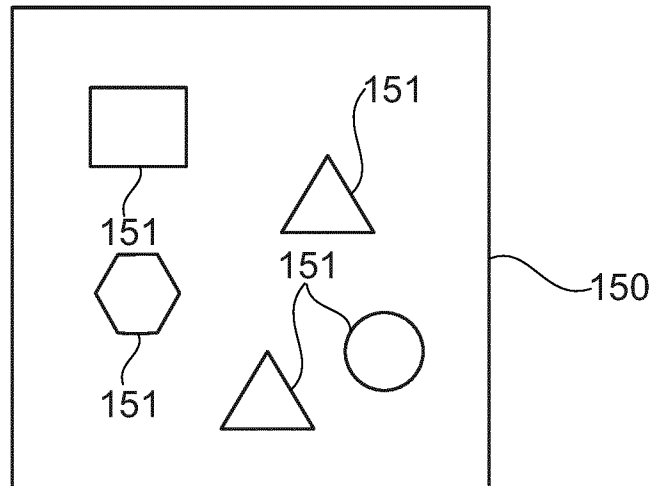


Fig. 8

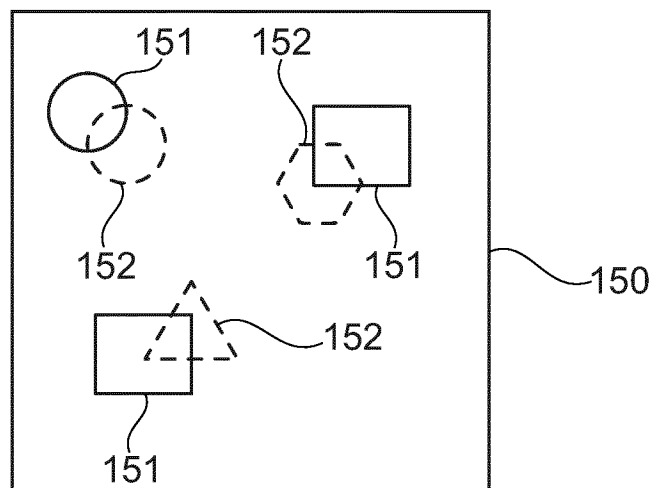


Fig. 9

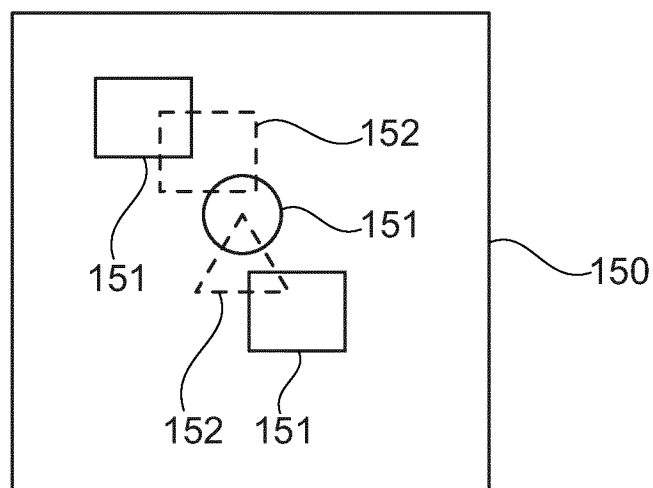


Fig. 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/060770

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G03F7/20 G03F1/84
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G03F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 10 2009 038558 A1 (ZEISS CARL SMS GMBH [DE]) 10 March 2011 (2011-03-10) paragraphs [0001], [0007] - [0015], [0062] - [0070] -----	1-22
A	DE 10 2010 062763 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 14 June 2012 (2012-06-14) paragraphs [0085] - [0089]; figures 4a-c -----	1-22
A	DE 10 2012 111008 A1 (PRECITEC OPTRONIK GMBH [DE]) 15 May 2014 (2014-05-15) paragraphs [0010], [0014], [0024] - [0028] -----	1-22



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

10 September 2015

Date of mailing of the international search report

21/10/2015

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Eisner, Klaus

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/060770

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102009038558 A1	10-03-2011	DE 102009038558 A1	10-03-2011
		US 2011090329 A1	21-04-2011

DE 102010062763 A1	14-06-2012	DE 102010062763 A1	14-06-2012
		TW 201237562 A	16-09-2012
		US 2013271749 A1	17-10-2013
		WO 2012076335 A1	14-06-2012

DE 102012111008 A1	15-05-2014	CN 104797903 A	22-07-2015
		DE 102012111008 A1	15-05-2014
		EP 2920544 A1	23-09-2015
		WO 2014076649 A1	22-05-2014

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G03F7/20 G03F1/84
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G03F

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 10 2009 038558 A1 (ZEISS CARL SMS GMBH [DE]) 10. März 2011 (2011-03-10) Absätze [0001], [0007] - [0015], [0062] - [0070]	1-22
A	DE 10 2010 062763 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 14. Juni 2012 (2012-06-14) Absätze [0085] - [0089]; Abbildungen 4a-c	1-22
A	DE 10 2012 111008 A1 (PRECITEC OPTRONIK GMBH [DE]) 15. Mai 2014 (2014-05-15) Absätze [0010], [0014], [0024] - [0028]	1-22



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

10. September 2015

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

21/10/2015

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Eisner, Klaus

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/060770

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102009038558 A1	10-03-2011	DE 102009038558 A1	10-03-2011
		US 2011090329 A1	21-04-2011

DE 102010062763 A1	14-06-2012	DE 102010062763 A1	14-06-2012
		TW 201237562 A	16-09-2012
		US 2013271749 A1	17-10-2013
		WO 2012076335 A1	14-06-2012

DE 102012111008 A1	15-05-2014	CN 104797903 A	22-07-2015
		DE 102012111008 A1	15-05-2014
		EP 2920544 A1	23-09-2015
		WO 2014076649 A1	22-05-2014
